

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**JULIA NORDIO APPI**

**ESTUDO DE METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS COM NANOTUBO  
DE CARBONO PARA POTENCIAL DESENVOLVIMENTO DE  
SENSORES PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2016**

**JULIA NORDIO APPI**

**ESTUDO DE METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS COM NANOTUBO  
DE CARBONO PARA POTENCIAL DESENVOLVIMENTO DE  
SENSORES PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Mestre Paulo Cezar Vitorio Junior

**PATO BRANCO**

**2016**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

# **ESTUDO DE METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS COM NANOTUBO DE CARBONO PARA POTENCIAL DESENVOLVIMENTO DE SENSORES PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL**

**JULIA NORDIO APPI**

No dia 21 de novembro de 2016, às 14h45min, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº24-TCC/2016.

Orientador: Prof. Msc. PAULO CEZAR VITORIO JUNIOR (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. PAÔLA REGINA DALCANAL (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARINA ROCHA PINTO PORTELA NUNES (DACOC/UTFPR-PB)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, Que sempre abençoou e iluminou a minha caminhada.

Aos meus pais, Luiz Antonio Appi e Cecilia Nordio Appi, que sempre apoiaram as minhas decisões, me incentivaram a estudar e me apoiaram durante todo o curso.

A Jean Lucas Esquivel Santos e Layane Hayame Souza Chaves pelo constante apoio, auxílio com as palavras e amizade.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Pato Branco, por toda dedicação e empenho em repassar seus conhecimentos durante toda a graduação, em especial ao meu orientador Professor Mestre Paulo Cezar Vitorio Junior pelo auxílio na condução desse trabalho, pelos ensinamentos compartilhados, pela dedicação e, principalmente, pelo apoio no decorrer desse ano.

Às professoras membros da banca Dr<sup>a</sup>. Paôla Regina Dalcanal e Dr<sup>a</sup>. Marina Rocha Pinto Portela Nunes, pelos comentários, correções e contribuições para o enriquecimento desse trabalho.

À CAPES, pela bolsa recebida durante o Programa Ciências sem Fronteiras, sem a qual esse trabalho não seria possível.

A todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação. Obrigada a todos pelo companheirismo.

## RESUMO

NORDIO APPI, Julia. **Estudo de metodologias experimentais com nanotubo de carbono para potencial desenvolvimento de sensores para monitoramento estrutural**. 89 páginas. Monografia (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2016.

A ausência de manutenção preventiva em obras de infraestrutura tem causado danos às mesmas. O monitoramento estrutural contínuo é uma solução para auxiliar na prevenção de danos causados nessas estruturas. Atualmente, os nanotubos de carbono vêm se mostrando eficientes no que tange ao desenvolvimento de sensores. Esta pesquisa tem por objetivo utilizar três métodos para o processamento de nanotubos de carbono, *Three Roll Mill*, *Sizing*, e *Electrophoretic Deposition* (EPD), para encontrar qual deles possui o maior fator de sensibilidade. Para isso, foi realizado um estudo experimental com o desenvolvimento de corpos de prova, onde os nanotubos de carbono foram processados de forma diferente para cada método. No método *Sizing*, as fibras foram imersas em uma solução comercial de nanotubo de carbono diluída em água, usando duas concentrações (1:2 e 1:5, *Sizing agent*:água). No método *Three Roll Mill*, os nanotubos de carbono foram dispersados na resina epóxi por meio do processo de calandragem, empregando 0,25% e 0,50% de peso de nanotubo de carbono na matriz epóxi. No método EPD, uma corrente contínua de 20V era aplicada em uma solução aquosa carregada positivamente com nanotubos de carbono até o peso depositado dos nanocompósitos ser de 0,045g. Finalizados os processos de deposição, iniciou-se a segunda etapa, a infusão dos corpos de prova com resina epóxi pelo processo *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* - VARTM (Modelagem por transferência de resina a vácuo). Por último, foram coladas placas de acrílico nas bordas dos corpos de prova, para reduzir a concentração de tensões na interface entre o exemplar e a máquina de ensaios mecânicos, e fixados os fios para fazer a leitura da resistência e os extensômetros, que auxiliaram na obtenção dos valores de deformação. Após finalizadas essas etapas, os corpos de prova foram testados por meio do ensaio de tração. A análise realizada após o rompimento dos corpos de prova mostrou que os sensores desenvolvidos pelo método EPD foram os que apresentaram maior fator de sensibilidade, porém, foi o método que apresentou o maior erro-padrão. Já o método *Three Roll Mill* com 0,25% de peso de nanotubo de carbono na matriz epóxi, apesar de apresentar um fator de sensibilidade menor do que o EPD, foi o método que apresentou os melhores resultados considerando-se a análise estatística. A partir disso, sabe-se que os sensores fabricados pelo método EPD são os mais sensíveis e os fabricados pelo método *Three Roll Mill* 0,25% são os que apresentam resultados mais confiáveis.

**Palavras-chave:** nanotubos de carbono; monitoramento estrutural; *Sizing*; *Three Roll Mill*; *Electrophoretic Deposition*; fator de sensibilidade.

## ABSTRACT

NORDIO APPI, Julia. **Experimental methodological study of carbon nanotube for potential development of sensors for structural health monitoring**. 89 pages. Monograph (Civil Engineering Course) – Federal University of Technology – Paraná. Pato Branco, 2016.

The lack of preventive maintenance has caused damage to infrastructure. Continuous structural monitoring is one solution to help prevent damage to those structures. Today, carbon nanotubes have proven to be efficient in the development of sensors. For this purpose, an experimental study was carried out developing specimens, where the carbon nanotubes were processed according to each method. In the Sizing method, the fibers were dipped in a commercial carbon nanotube solution diluted with water of two different concentrations (1: 2 and 1: 5, Sizing agent: water). In the Three Roll Mill method, the carbon nanotubes were dispersed in epoxy resin by the calendaring method, using 0.25% wt and 0.50% wt of carbon nanotube in the matrix. In the EPD method, a 20 V direct current was applied to an aqueous solution of positively charged carbon nanotubes until the deposited weight of the nanocomposites was 0.045 g. After the deposition process, the specimens were infused with epoxy resin using Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) process. Finally, end tabs were bonded to the edges of the specimens to reduce the concentration of stresses at the interface between the specimen and the mechanical testing machine. They were then attached the electrodes to read the resistance and strain gages in order to obtain the deformation values. After completing those steps, the specimens were tested using the tensile test. The analysis performed after the rupture of the specimens showed that the sensors developed by the EPD method presented the highest gage factor, although, it was the method that presented the highest standard error. The Three Roll Mill method with 0.25% wt of carbon nanotube in the matrix, despite presenting a lower gage factor than the EPD method, was the method with the best results according to the statistical analysis. As a result, it was concluded that the sensors manufactured by the EPD method are the most sensitive while those manufactured by the Three Roll Mill method with 0.25% wt of carbon nanotube present the most reliable results.

**Keywords:** carbon nanotubes; structural health monitoring; sizing; three roll mill; electrophoretic deposition; gage factor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fulereo $C_{60}$ .....	6
Figura 2 – Representação esquemática da estrutura de nanotubos de carbono .....	7
Figura 3 – Geometria do nanotubos de parede simples.....	8
Figura 4 – Diagrama do extensômetro .....	9
Figura 5 – Extensômetro axial único .....	10
Figura 6 – Tipos de extensômetros múltiplos.....	10
Figura 7 – Funcionamento do sistema de monitoramento por GPS.....	14
Figura 8 – Extensômetros no monitoramento de pontes.....	15
Figura 9 – Raio X .....	15
Figura 10 – Disposição dos objetos na viga e posicionamento da malha de 75 mm	17
Figura 11 – Superfície de análise – Malha 75 X 75 mm.....	17
Figura 12 – Equipamento de Ultrassom.....	18
Figura 13 – <i>Layout</i> dos sensores de fibra óptica na Ponte de <i>Jiangyin</i> .....	19
Figura 14 – Termograma e foto da Igreja São Francisco de Assis, 2006, Belo Horizonte, Brasil.....	20
Figura 15 – Esquema dos pilares de concreto – Marcos utilizados na técnica geodésica .....	21
Figura 16 – Configuração da rede de monitoramento geodésica.....	22
Figura 17 – Etapas da pesquisa.....	28
Figura 18 – Corpo de prova finalizado .....	29
Figura 19 – <i>Aramid Veil</i> 50 g/m <sup>2</sup> .....	30
Figura 20 – <i>Sizing</i> .....	31
Figura 21 – Diagrama esquemático mostrando a configuração geral do <i>Three Roll Mill</i> .....	32
Figura 22 – Desenvolvimento da estrutura dos nanocompósitos após o processamento em diferentes espaços. (a) 50 $\mu$ m, (b) 20 $\mu$ m, (c) 10 $\mu$ m e (d) 5 $\mu$ m .....	33
Figura 23 – Processamento do nanocompósitos misturados com a resina epóxi .....	34
Figura 24 – Mistura dos nanocompósitos com a resina epóxi na máquina a vácuo..	35
Figura 25 – Misturador mecânico .....	36
Figura 26 – Misturador magnético.....	36
Figura 27 – Sonicador .....	36

Figura 28 – Banho de circulação com resfriamento .....	38
Figura 29 – Funcionamento do EPD .....	39
Figura 30 – Placa metálica utilizada no processo de EPD com as tiras de <i>Aramid Veil</i> imergidas na solução de nanotubo de carbono.....	39
Figura 31 – Representação do dispositivo utilizado no processo de EPD .....	40
Figura 32 – Conjunto (placa e fibras) submersos na solução de nanotubo de carbono .....	40
Figura 33 – Método VARTM.....	41
Figura 34 – Fita adesiva para alta temperatura colada na fibra com nanotubo de carbono .....	42
Figura 35 – Conjunto pronto para infusão .....	43
Figura 36 – Montagem da placa com os exemplares do <i>Sizing</i> .....	44
Figura 37 – Infusão da resina.....	44
Figura 38 – Montagem da <i>Vacuum bag</i> para o <i>Three Roll Mill</i> .....	45
Figura 39 – Infusão da resina.....	45
Figura 40 – Fio elétrico preso aos corpos de prova .....	46
Figura 41 – Preparação dos corpos de prova .....	47
Figura 42 – Fixação dos fios para a medição da resistência.....	47
Figura 43 – Corpos de prova prontos.....	48
Figura 44 – <i>Instron 5567</i> .....	49
Figura 45 – Rompimento dos corpos de prova.....	50



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resistência Elétrica (W) versus Tempo (s).....	51
Gráfico 2 – Resistência Elétrica (W) versus Tempo (s) (apenas região de análise)..	52
Gráfico 3 – <i>Sizing</i> 1:2 (corpo de prova 1) .....	53
Gráfico 4 – <i>Sizing</i> 1:2 (corpo de prova 2).....	54
Gráfico 5 – <i>Sizing</i> 1:2 (corpo de prova 3) .....	54
Gráfico 6 – <i>Sizing</i> 1:2 (corpo de prova 4).....	55
Gráfico 7 – <i>Sizing</i> 1:2 (corpo de prova 5).....	55
Gráfico 8 – <i>Sizing</i> 1:2 .....	56
Gráfico 9 – <i>Sizing</i> 1:5 (corpo de prova 1) .....	57
Gráfico 10 – <i>Sizing</i> 1:5 (corpo de prova 2).....	57
Gráfico 11 – <i>Sizing</i> 1:5 (corpo de prova 3).....	58
Gráfico 12 – <i>Sizing</i> 1:5 (corpo de prova 4).....	58
Gráfico 13 – <i>Sizing</i> 1:5 (corpo de prova 5).....	59
Gráfico 14 – <i>Sizing</i> 1:5 .....	59
Gráfico 15 – <i>Three Roll Mill</i> 0,25% (corpo de prova 1).....	60
Gráfico 16 – <i>Three Roll Mill</i> 0,25% (corpo de prova 2).....	61
Gráfico 17 – <i>Three Roll Mill</i> 0,25% (corpo de prova 3).....	61
Gráfico 18 – <i>Three Roll Mill</i> 0,25% (corpo de prova 4).....	62
Gráfico 19 – <i>Three Roll Mill</i> 0,25%.....	62
Gráfico 20 – <i>Three Roll Mill</i> 0,50% (corpo de prova 1).....	63
Gráfico 21 – <i>Three Roll Mill</i> 0,50% (corpo de prova 2).....	64
Gráfico 22 – <i>Three Roll Mill</i> 0,50% (corpo de prova 3).....	64
Gráfico 23 – <i>Three Roll Mill</i> 0,50% (corpo de prova 4).....	65
Gráfico 24 – <i>Three Roll Mill</i> 0,50%.....	65
Gráfico 25 – EPD (corpo de prova 1) .....	66
Gráfico 26 – EPD (corpo de prova 2) .....	67
Gráfico 27 – EPD (corpo de prova 3) .....	67
Gráfico 28 – EPD (corpo de prova 4) .....	68
Gráfico 29 – EPD .....	68
Gráfico 30 – Fator de sensibilidade com barra de erro .....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de corpos de prova confeccionados para cada método.....	29
Tabela 2 – <i>Sizing</i> 1:2.....	56
Tabela 3 – <i>Sizing</i> 1:5.....	59
Tabela 4 – <i>Three Roll Mill</i> 0,25% .....	62
Tabela 5 – <i>Three Roll Mill</i> 0,50% .....	65
Tabela 6 – <i>Eletrophoretic Deposition</i> (EPD).....	68

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	3
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
1.3	JUSTIFICATIVA.....	3
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
2.1	NANOTUBOS DE CARBONO.....	6
2.1.1	Histórico.....	6
2.1.2	Estrutura dos nanotubos de carbono.....	7
2.1.3	Pesquisas com os nanotubos de carbono .....	8
2.2	EXTENSÔMETROS .....	9
2.3	MONITORAMENTO .....	11
2.3.1	Sistema de Posicionamento Global (GPS) e Extensômetros .....	13
2.3.2	Raio X e Emissão Acústica.....	15
2.3.3	Ultrassom .....	16
2.3.4	Fibra Óptica .....	18
2.3.5	Termografia .....	19
2.3.6	Técnica Geodésica.....	21
2.3.7	Nanotubo de carbono .....	22
2.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	23
2.4.1	Média.....	23
2.4.2	Desvio-padrão .....	23
2.4.3	Coeficiente de Variação.....	24
2.4.4	Erro-padrão .....	24
2.4.5	Barra de erro.....	24
2.4.6	Ruído .....	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
3.1	ETAPAS DA PESQUISA .....	26
3.1.1	Fabricação dos Corpos de Prova com nanotubos de carbono.....	29
3.1.1.1	<i>Sizing</i> .....	30
3.1.1.2	<i>Three Roll Mill</i> .....	31
3.1.1.3	<i>Electrophoretic Deposition (EPD)</i> .....	35

3.1.1.4	Infusão da resina .....	41
3.1.1.4.1	<i>Sizing</i> .....	43
3.1.1.4.2	<i>Three Roll Mill</i> .....	45
3.1.1.4.3	<i>Electrophoretic Deposition (EPD)</i> .....	46
3.1.1.5	Finalização dos corpos de prova .....	46
3.1.2	Ensaio de tração.....	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
4.1	DETERMINAÇÃO DOS RESULTADOS.....	51
4.2	SIZING.....	53
4.2.1	<i>Sizing 1:2</i> .....	53
4.2.2	<i>Sizing 1:5</i> .....	56
4.3	THREE ROLL MILL .....	60
4.3.1	<i>Three Roll Mill 0,25%</i> .....	60
4.3.2	<i>Three Roll Mill 0,50%</i> .....	63
4.4	ELECTROPHORETIC DEPOSITION (EPD) .....	66
4.5	SÍNTESE DOS RESULTADOS .....	69
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A malha rodoviária nacional teve um importante desenvolvimento nos últimos quarenta anos. Nesse período, houve investimentos financeiros para a expansão da mesma, bem como investimentos em novas soluções estruturais para pontes e viadutos. Porém, junto com este desenvolvimento surgiu um problema estrutural: a deterioração destas estruturas aumenta em função da inexistência da cultura da manutenção preventiva das mesmas (LAROCCA et al., 2015).

Segundo VILLANUEVA (2015), foi apurado, em pesquisas realizadas pelo IBAPE-SP, que em construções com mais de uma década 60% dos acidentes ocorreram por deficiência ou ausência de manutenção, podendo esta ser preventiva (baseada em critérios predefinidos para evitar a falha da estrutura) ou corretiva (efetuada após a falha).

A realização da manutenção preventiva não é um comportamento difundido no Brasil. Isso pode ser observado, principalmente em centros urbanos, onde as pontes, viadutos, marquises e até mesmo as sacadas das edificações estão em estado de alerta (VEIGA, 2007).

Embora o Brasil apresente órgãos regulamentadores que fornecem todo o procedimento para a inspeção e garantia da integridade de obras de arte especiais (OAEs), em grande parte dos casos, as patologias são detectadas e as providências são tomadas apenas quando a deterioração da estrutura atinge um estado crítico ou quando oferece risco aos usuários (LAROCCA et al., 2015, p. 291).

Segundo Agostinho (2012), o monitoramento das estruturas atualmente é executado, principalmente, por quatro métodos: de inspeção visual; não destrutivo; parcialmente destrutivo; ou destrutivos. Porém, como Thostenson e Chou (2008a) afirmam, essas técnicas não são capazes de efetuar o monitoramento em tempo real da evolução do dano sofrido pela estrutura.

No início dos anos 90, o monitoramento estrutural (*Structural Health Monitoring* – SHM) apresentou progresso na construção civil (NERY, 2013). Atualmente, podem ser encontrados monitoramentos realizados por meio de: Sistema de Posicionamento Global (GPS); extensômetros; raio X; emissão acústica; ultrassom;

fibra óptica; termografia; técnica geodésica, entre outras. Todavia, nenhum desses métodos é 100% preciso, e alguns apresentam altos custos para execução.

Em 1991, houve a descoberta de importantes nanopartículas, os nanotubos de carbono. Estes são compostos por átomos de carbono ligados em formas hexagonais, com cada átomo de carbono ligado covalentemente a três outros átomos de carbono. O diâmetro dos nanotubos de carbono pode ser menor que 1 nm, mas seu comprimento pode atingir centímetros (100 vezes o diâmetro). O nanotubo de carbono é um material resistente, que pode ser dobrado, mas que tende a retornar ao seu estado original quanto for solto (BOYSEN; BOOKER, 2011).

Com a capacidade de unir materiais em nanoescala, é possível aumentar a funcionalidade de sistemas existentes, como os extensômetros, que possuem limitações, devido ao seu tamanho e à influência da temperatura. Por esse motivo, há um progressivo interesse em pesquisas de materiais semicondutores alternativos, com boa estabilidade térmica e química com propriedades piezoresistivas, “propriedade do material de alterar sua resistividade elétrica quando submetido a uma tensão mecânica (*stress*), ou seja, é a variação da resistividade em função da deformação (*strain*) sofrida pelo material” (FURLAN; FRAGA, 2010, p. 01)

Os nanotubos de carbono são excepcionalmente multifuncionais devido à combinação de suas excelentes propriedades mecânicas com suas propriedades elétricas e térmicas (alta resistência e ao mesmo tempo sendo elástico, e suas propriedades elétricas similares com as de semicondutores). Além disso, é possível obter um bom limite de percolação (boa condução elétrica) utilizando baixa concentração de nanotubo de carbono, geralmente menos do que 0,1%. Portanto, é possível utilizar esses compósitos como sensores (THOSTENSON; CHOU, 2008a).

Desta forma, o presente trabalho visa realizar uma pesquisa, com o intuito de desenvolver potenciais sensores com nanotubos de carbono para o monitoramento estrutural, auxiliando no prolongamento da vida útil das estruturas. Esta pesquisa é parte de um projeto que começou a ser desenvolvido na Universidade de Delaware, (EUA), portanto há alguns termos que por motivos de citação ou por não haver termo certo em português, foram deixados em inglês. Foram desenvolvidos corpos de provas por três métodos diferentes: *Three Roll Mill*, *Sizing* e *Electrophoretic Deposition*. Os corpos de prova foram rompidos pelo ensaio de tração e, após analisados os dados obtidos, calculou-se o fator de sensibilidade e obteve-se o método com maior fator de sensibilidade para desenvolver futuras pesquisas e

potenciais sensores para o monitoramento de estruturas. Por fim, apresentam-se os resultados obtidos e as considerações finais sobre o assunto.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Obter o método com maior fator de sensibilidade para o potencial desenvolvimento de sensores para o monitoramento de estruturas, a partir da análise dos dados obtidos pelo rompimento dos corpos de prova processados com nanotubos de carbono por três diferentes métodos:

- *Three Roll Mill*;
- *Sizing*;
- *Electrophoretic Deposition*.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Processar os nanotubos de carbono com epóxi e resina de forma diferente para cada método;
- Desenvolver e romper os corpos de prova;
- Analisar os dados obtidos e calcular o fator de sensibilidade;
- Obter o método mais sensível.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Parte dos recursos financeiros disponíveis na administração pública é investida em obras de infraestrutura urbana, tais como pontes, viadutos, edifícios, aeroportos, etc. O engenheiro civil é o principal responsável pelo projeto, execução e monitoramento dessas obras de infraestrutura. Além de empregar os procedimentos adequados no projeto e na execução, é importante o planejamento das atividades de inspeção e manutenção das estruturas.

Entretanto, sabe-se que as atividades de inspeção, manutenção e reparação hoje executadas no Brasil, no que tange a estruturas de concreto, enfrentam uma série de problemas como normatização desatualizada e ausência de padronização (LIMA, 2013).

Segundo Santiago (2008 apud CALÇADA, 2014) apesar do setor de construção ter evoluído, ainda encontram-se muitas obras utilizando processos construtivos defasados, e improvisados.

Segundo Li, Li e Song (2004), o teste para deterioração da estrutura só é feito após surgirem graves falhas na mesma. Quando a necessidade dos testes é incontestável, os danos na estrutura já estão em tal estágio que a confiabilidade da metodologia empregada para a medição passa a ser reduzida. A inspeção visual, mesmo tendo sua eficácia contestada, ainda é um dos métodos mais utilizados para o monitoramento de estruturas, chegando ao ponto de ser obrigatório em alguns países.

Uma pesquisa feita por Moore et al. (2001 apud LI; LI; SONG, 2004) para o Departamento Federal de Rodovias dos EUA (*US Federal Highway Administration – FHWA*) evidenciou que no máximo 68% das inspeções visuais em pontes eram feitas corretamente, mas mesmo com inspeções detalhadas não era possível encontrar falhas internas na estrutura, considerando que a inspeção visual é apenas externa.

Segundo GAO et al. (2010), os projetos podem apresentar falhas e estas influenciam diretamente à durabilidade e à resistência da estrutura a possíveis danos que possam ocorrer. Evidencia-se então, a importância do desenvolvimento de tecnologias capazes de realizar o monitoramento continuado em estruturas através de metodologias não destrutivas.

A análise do comportamento estrutural para avaliar o nível de conservação de obras construídas tem sido tema de investigação crescente e de reconhecido interesse técnico-científico. O monitoramento estrutural tem a capacidade de detectar falhas estruturais e, conseqüentemente, prever manutenções, apresentando importantes reflexos na vida útil e segurança de estruturas. (BITTENCOURT, 2012, p. 01)

Os extensômetros são uma opção para a análise e monitoramento estrutural, entretanto, os mesmos têm dimensões que possibilitam apenas análises pontuais, em pequenas áreas, e se não são posicionados diretamente sobre o ponto onde a estrutura possa sofrer deterioração, os dados podem não ser registrados. Portanto, estes sensores não monitoram toda a extensão da estrutura de concreto, além de apresentarem limitações quanto a influência da temperatura.

Tecnologias como Fibra Óptica também tem sido estudadas e apresentam algumas vantagens sobre os extensômetros, visto que eles podem ser incorporados



às estruturas durante a construção e fazem a leitura da alteração das tensões ao longo do comprimento da mesma. Porém, apesar de se sobressaírem em relação aos extensômetros, os sensores de fibra óptica ainda não fazem o monitoramento de toda a estrutura, além de serem sensíveis na sua colocação, pois podem ser facilmente danificadas no momento da concretagem da estrutura (GAO et al., 2010).

Um sistema de monitoramento ideal deve ser capaz de medir as deteriorações em micro e macro escala durante toda a vida útil da estrutura. Os nanotubos de carbono são excelentes candidatos para o futuro dos sensores, pois eles apresentam alta condutividade térmica, bem como condutividade elétrica (THOSTENSON; CHOU, 2006). Além disso, apresentam propriedades piezoresistiva, que é a “propriedade do material de alterar sua resistividade elétrica quando submetido a uma tensão mecânica (*stress*), ou seja, é a variação da resistividade em função da deformação (*strain*) sofrida pelo material (Furlan e Fraga, 2010, p.01)”, oferecendo aos nanotubos de carbono o potencial para detectar a formação de fissuras em microescala (THOSTENSON; CHOU, 2008b).

Portanto, este trabalho visa o potencial desenvolvimento de sensores com nanotubos de carbono que serão implantados sobre a estrutura para o monitoramento da mesma. Estes sensores implantados na superfície da estrutura objetivam a identificação de danos sendo formados ou que já existam nas estruturas (micro e macro fissurações), mas que não podem ser capturados por outros sensores, como os extensômetros e os de fibra óptica.

Para o desenvolvimento do trabalho serão utilizados os dados obtidos em pesquisa realizada pela presente pesquisadora durante os meses de junho a agosto de 2015 na Universidade de Delaware, EUA, onde foram confeccionados corpos de prova por três métodos diferentes (*Sizing, Three Roll Mill e Electrophoretic Deposition*) e realizados os ensaios de tração, viabilizando assim a análise e a determinação do método mais sensível.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 NANOTUBOS DE CARBONO

Apesar de serem descobertos em 1985 por Rick Smalley, os nanotubos de carbono (NC) só começaram a ser amplamente estudados após a publicação de Sumio Iijima em 1991 (GRABOWSKI et al., 2014), pois os mesmos apresentam excelentes propriedades mecânicas, alta condutividade elétrica e estabilidade térmica (KANOUN et al., 2014).

#### 2.1.1 Histórico

Foi a partir da descoberta do fulereno  $C_{60}$  que se desenvolveram os nanotubos de carbono. Em 1985, Richard Smalley e sua equipe produziram os fulerenos, que segundo DOS SANTOS et al. (2009, p. 680):

[...] constituem uma classe de nanomoléculas esferoidais estáveis formadas exclusivamente por átomos de carbono. Ao contrário das outras formas alotrópicas de carbono, como grafite, diamante e nanotubos, os fulerenos são uma forma molecular de carbono

Estes tem o formato de icosaedros compostos por 12 pentágonos e 20 hexágonos (O'CONNELL, 2006) (Figura 1).



Fulereno- $C_{60}$

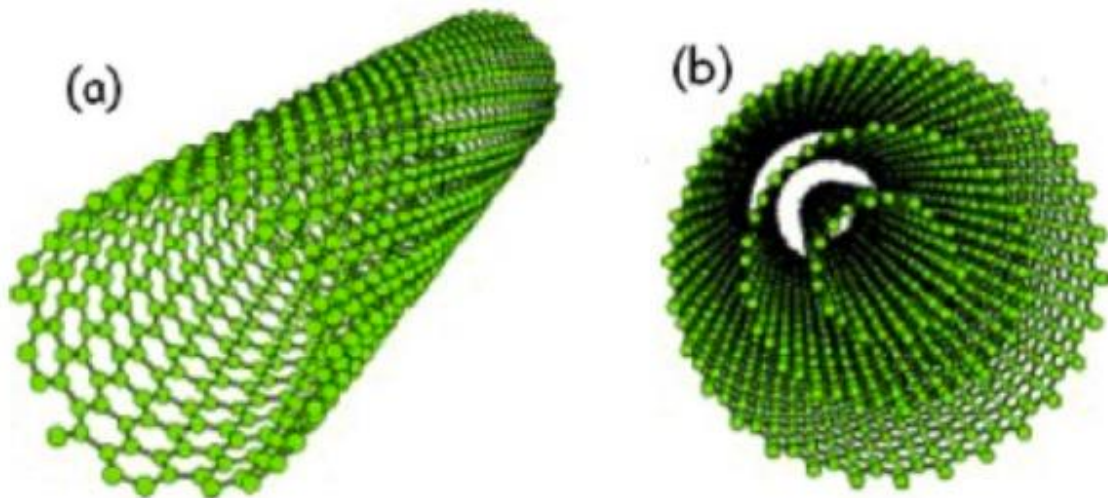
**Figura 1 – Fulereno  $C_{60}$**   
**Fonte: DOS SANTOS et al., 2009, p. 682**

Em 1991, posteriormente à divulgação da técnica utilizada para sintetizar quantidades macroscópicas de fulerenos, Sumio Iijima realizou uma pequena, mas

determinante, alteração no método de síntese; ao invés de permitir que os eletrodos de grafite entrassem em contato entre si, manteve-os isolados durante o processo de descargas elétricas. O estudo do material formado durante as descargas elétricas ao microscópio eletrônico trouxe a conhecimento público a existência do nanotubo de carbono (ROCHA-FILHO, 1996).

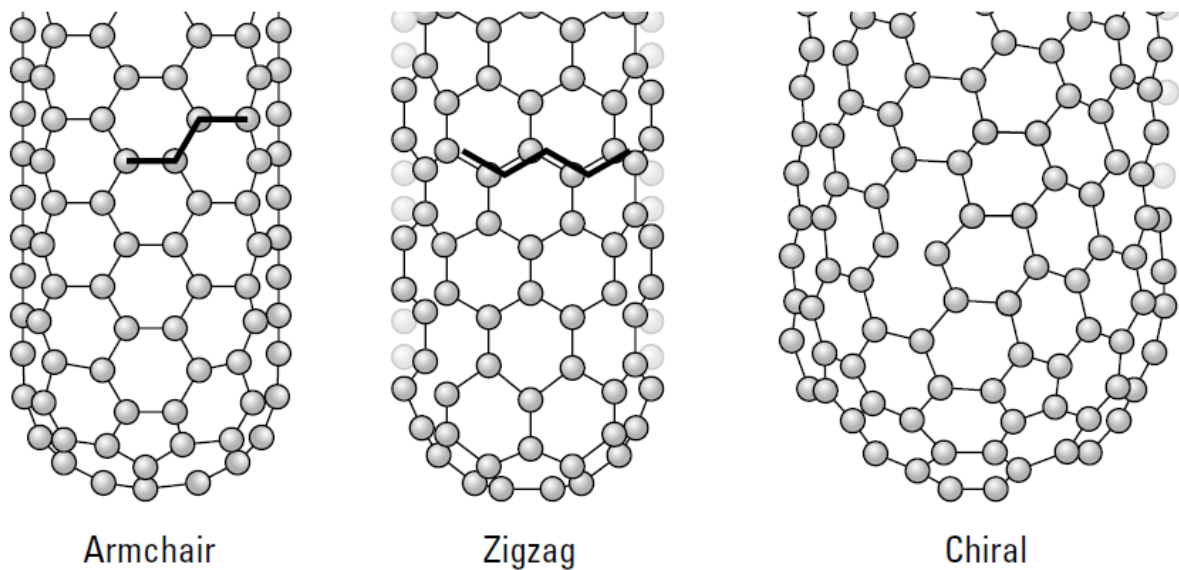
### 2.1.2 Estrutura dos nanotubos de carbono

O nanotubo de carbono é um cilindro formado pela ligação covalente de átomos de carbono (BOYSEN; BOOKER, 2011). Estes cilindros podem ter parede simples, sendo chamados de nanotubo de carbono de parede simples (NCPS), ou parede múltipla, nanotubo de carbono de parede múltipla (NCPM). O NCPS é composto por uma folha singular de carbono enrolada no seu eixo, já o NCPM é formado por um aglomerado de nanotubos concêntricos (HERBST; MACÊDO; ROCCO, 2004). A representação pode ser vista na Figura 2.



**Figura 2 – Representação esquemática da estrutura de nanotubos de carbono (a) nanotubo de parede simples, (b) nanotubo de parede múltipla**  
Fonte: ZARBIN, 2007, p. 1473

Cada átomo de carbono é ligado a outros três átomos de carbono, formando hexágonos. A orientação dos átomos de carbono gera três tipos diferentes de nanotubos. Os nanotubos *armchair* possuem a linha do hexágono paralela ao eixo do nanotubo, os nanotubos *zigzag*, há uma linha de ligação dos átomos de carbono abaixo do centro e os nanotubos *chiral* possuem uma espiral em volta do nanotubo (BOYSEN; BOOKER, 2011), estes podem ser vistos na Figura 3.



**Figura 3 – Geometria do nanotubos de parede simples**  
**Fonte: BOYSEN; BOOKER, 2011, p. 76**

### 2.1.3 Pesquisas com os nanotubos de carbono

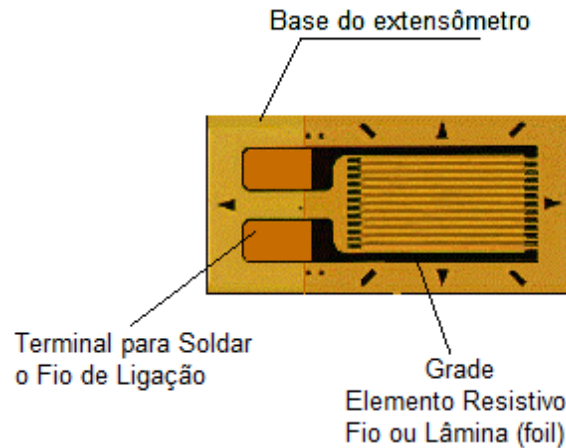
Segundo O'CONNELL (2006), desde a descoberta dos nanotubos de carbono, várias ideias para a aplicação dos mesmos começaram a surgir em diferentes campos científicos, abrangendo: eletrônica; optoeletrônica; sensores; baterias, células de energia; fibras, compósitos reforçados por fibras; medicina e biologia.

Thostenson, pesquisador da Universidade de Delaware, vem pesquisando nanotubos de carbono desde 2001. Segundo Thostenson, Ren e Chou (2001) as propriedades dos nanotubos de carbono variam conforme o arranjo atômico, o diâmetro e o comprimento dos tubos. Mas, apesar desta variação, os nanotubos de carbono apresentam propriedades mecânicas notáveis, tais como elevado módulo elástico, grande deformação elástica e deformação na ruptura (THOSTENSON; REN; CHOU, 2001), além de boas propriedades elétricas, térmicas e químicas.

Em razão das propriedades apresentadas pelos nanotubos de carbono, os mesmos passaram a ser utilizados no desenvolvimento de novos tipos de extensômetros, que podem superar as limitações encontradas pelos extensômetros atualmente disponíveis no mercado e, ainda, permitir um novo campo de atuação para eles (KANOUN et al., 2014).

## 2.2 EXTENSÔMETROS

O extensômetro de resistência elétrica, também conhecidos como *strain gage* ou *strain gauge* (Figura 4), é formado por uma grade de elemento resistivo, ligado a uma base que deve ser aderida à peça que se pretende ensaiar (FIALHO, 1982).



**Figura 4 – Diagrama do extensômetro**  
**Fonte: PORTNOI, 2016**

O extensômetro transforma a deformação mecânica sofrida pela estrutura em uma variação de resistência elétrica. A ponte de Wheatstone é a base de funcionamento deles. É por causa da deformação que ocorre no circuito elétrico formado por esta ponte que os extensômetros são capazes de computar a variação de resistência elétrica. Quando a estrutura analisada sofre deformação, provoca-se um desequilíbrio na ponte, gerando uma variação de tensão que é lida por uma placa de aquisição de dados. Esses dados são convertidos em grandezas específicas, conforme interesse da pesquisa (GRANTE, 2005).

De acordo com Portnoi (2016) e GRANTE (2005), existem extensômetros de diferentes formas e tamanhos. As formas se diferenciam na posição e quantidade de grades, bem como na posição dos conectores. Os extensômetros podem ser axial único ou axial múltiplo. O extensômetro axial único (Figura 5) é utilizado quando a deformação analisada ocorrer em uma única direção. Já o extensômetro axial múltiplo, é empregado quando há deformações em mais de uma direção. Os extensômetros axiais múltiplos são encontrados no formato de rosetas.

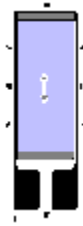


Figura 5 – Extensômetro axial único  
Fonte: PORTNOI, 2016

As rosetas podem ser encontradas como roseta de 2 direções (Figura 6 – a) e como roseta de 3 direções (Figura 6 – b, c). A roseta de 2 direções possui dois extensômetros sobre uma mesma base dispostas a  $90^\circ$ , que fará a leitura em dois sentidos quando as tensões principais dos pontos forem conhecidas (GRANTE, 2005; PORTNOI, 2016)

A roseta de 3 direções possui três extensômetros sobre uma mesma base, podendo ser encontrada em duas configurações, com ângulos de  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  e  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$  entre as grades. Estes tipos de rosetas serão utilizadas quando não há o conhecimento das direções principais de deformação.

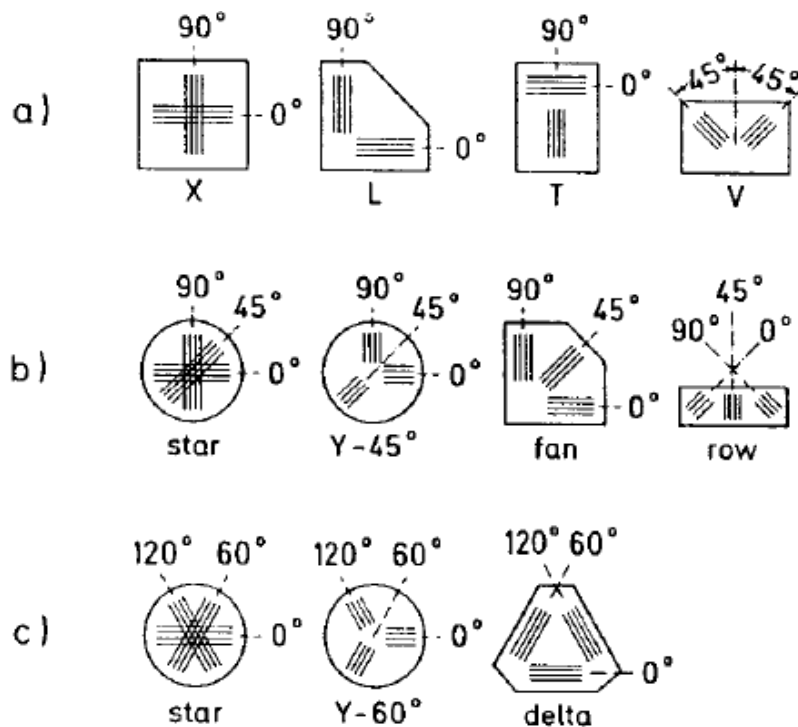


Figura 6 – Tipos de extensômetros múltiplos

a) Rosetas de 2 direções com grades cruzadas a  $90^\circ$ , para aplicação em tensões biaxiais, com as tensões principais do ponto conhecidas;

b) Rosetas de 3 direções com grades cruzadas a  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ ;

c) Rosetas de 3 direções com grades cruzadas a  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ .

Fonte: GRANTE, 2005, p. 18

O funcionamento do extensômetro de resistência elétrica é baseado no princípio de que, quando um condutor está sujeito a uma deformação, submetido a um esforço de tensão ou de compressão, há uma variação na sua resistência elétrica. A intensidade desta variação, relacionada com a resistência inicial é proporcional à intensidade do esforço aplicado. (WEBER, 2008)

Sobre a sensibilidade dos extensômetros de resistência elétrica, Beck e da Silva (2007) escrevem que a sensibilidade dos extensômetros de resistência elétrica é determinada pela sensibilidade das ligas metálicas empregadas na fabricação da grade. Quanto mais linhas existirem na grade do extensômetro de resistência elétrica (portanto existirão mais terminais afetados pelo gradiente de deformação), maior será sua sensibilidade em relação a leitura da resistência elétrica.

A sensibilidade de um sensor piezo-resistivo de nanotubo de carbono, assim como a sensibilidade dos extensômetros de resistência elétrica, pode ser quantificada pelo fator K, que é definido como a alteração relativa da resistência elétrica com a sua respectiva deformação (Equação 01):

$$K = \frac{l}{R} \frac{dR}{dl} \quad (01)$$

Onde  $dR/R$  é a alteração relativa da resistência elétrica, produzida pela deformação aplicada  $\epsilon = dl/l$ . O fator K é aproximadamente 2 para condutores metálicos clássicos como cobre e níquel, e para sensores compostos por nanotubo de carbono, este valor pode ser superior (3 a 4 vezes em relação aos condutores metálicos clássicos). O elevado valor de K para os sensores de nanotubo de carbono ocorre por dois fatores principais: a mudança na geometria do sensor e a alteração na rede de percolação do sistema (KANOUN et al., 2014).

### 2.3 MONITORAMENTO

Segundo Larocca et al. (2015), em um estudo intitulado “Infraestrutura da Cidade: Prazo de Validade Vencido”, feito pela SINAENCO (Sindicato Nacional das Empresas de Arquitetura e Engenharia Consultiva), há uma insuficiência na política de conservação das estruturas e falha no gerenciamento dos recursos. Apenas em São Paulo, existem 240 pontes e viadutos em estado de degradação, manifestando distintas patologias, e apresentando perigo aos usuários. A principal causa atribuída à deterioração das estruturas é o baixo investimento em manutenção, que

corresponde a 0,38% do custo total das construções, a exposição de armaduras por falta de conservação ou que ocorrem pelo impacto de automóveis com altura acima do permitido, resultando em carbonatação. Há existência de trincas, rachaduras com espessura superior a 3 cm, eflorescência e lixiviação em diversas estruturas.

De acordo com Agostinho (2012), o monitoramento das estruturas atualmente é feito, principalmente, por quatro métodos: inspeção visual (há apenas a análise visual da estrutura, podendo se utilizar de algum equipamento de medição, como teodolitos e fita métrica, para avaliação de fissuras e deslocamento da estrutura); inspeção não destrutiva (fornece características mecânicas do material, sem danificar a estrutura, como sprays, utilizados para evidenciar a descontinuidade sobre uma superfície; esclerômetro, utilizado para a avaliação da dureza superficial do concreto; entre outros); inspeção parcialmente destrutiva (fornece informações mais detalhadas sobre as características do material do que o método não destrutivo, são exemplos desse método a penetração controlada, permite avaliar a resistência de cada camada e pode ser útil para obter informação sobre a resistência mecânica das camadas internas por meio da penetração de um prego de aço guiado pelo aparelho *Martinet Baronnie*; dilatômetro, que mede a evolução da distância entre dois testemunhos metálicos (base) colocados um de cada lado da fissura; entre outros); inspeção destrutiva (há o parcial ou total rompimento do corpo de prova, extraído da estrutura, ensaios de carga, como a extração de cilindros de concreto ou de segmentos de aço para avaliar a resistência do material). Porém, como Thostenson e Chou (2008a) afirmam, essas técnicas não são capazes de efetuar o monitoramento em tempo real da evolução do dano sofrido pela estrutura.

O monitoramento estrutural (*Structural Health Monitoring – SHM*) começou a ter progresso na construção civil no início dos anos 90 (NERY, 2013). Desde então, é crescente a quantidade de estudos sobre Ensaio Não-destrutivo (*Non Destructive Testing – NDT*), pois estes métodos não alteram a aparência e nem o desempenho da estrutura monitorada (LORENZI et al., 2003)

O monitoramento estrutural refere-se a medições *in-situ*, contínuas ou regulares para análise da estrutura e dos parâmetros ambientais que a afetam, com a finalidade de detectar qualquer falha em estágio inicial, proporcionando a manutenção preventiva da construção (LI; LI; SONG, 2004). Conseqüentemente, por meio desse monitoramento é possível aumentar a vida útil das estruturas, sendo mais simples e econômico do que a restauração da obra (LORENZI et al., 2003).



Segundo Ko e Ni (2005), o desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento estrutural é ainda um desafio, que demanda grupos de pesquisas interdisciplinares para a adaptação de tecnologias desenvolvidas para aplicação em obras da construção civil.

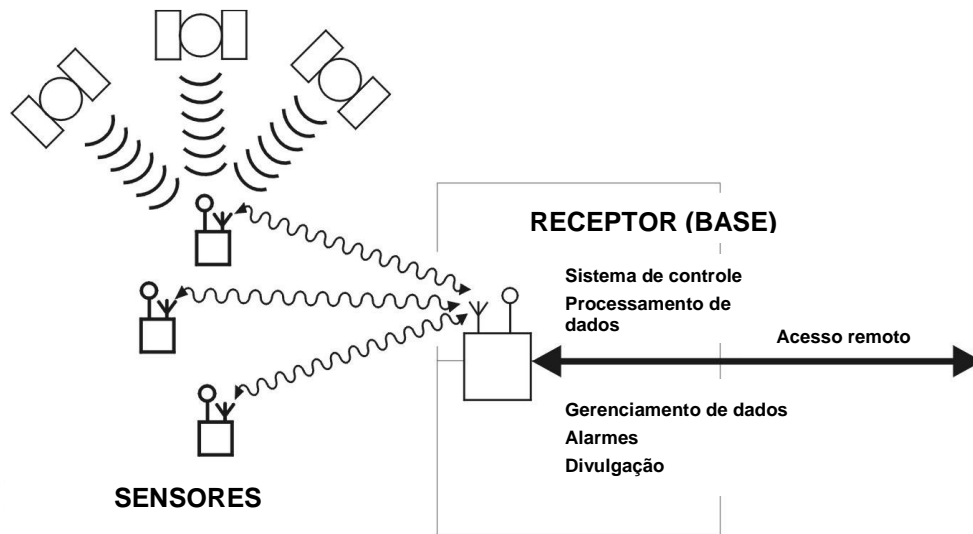
Como resultado de pesquisas, existem algumas tecnologias obtiveram êxito no monitoramento de estruturas. Entretanto, essas tecnologias ainda apresentam algum tipo de falha ou defeito no monitoramento, mas com o desenvolvimento das pesquisas, pode-se afirmar que em breve surgirão sistemas de monitoramento estruturais tão bons quanto a teoria almeja. Dentre as tecnologias existentes, pode-se citar: Sistema de Posicionamento Global (GPS), extensômetros; Raio X e Emissão Acústica; Ultrassom; Fibra Óptica; Termografia; Técnica Geodésica.

### 2.3.1 Sistema de Posicionamento Global (GPS) e Extensômetros

Entre as décadas 40 e 70 do século XX, o monitoramento de pontes era caracterizado pela observação visual. A partir dos anos 70 até os anos 90, houve um aumento no número de construções. Conseqüentemente, surgiram os primeiros equipamentos para auxiliar no monitoramento das estruturas, porém as medições ainda eram realizadas através de observação periódicas. No início do século XXI, houve investimento em pesquisas e um aumento na oferta de equipamentos para monitoramento estrutural, que foram projetados com o intuito de medir distintas grandezas (OLIVEIRA SANTOS, 2014).

É importante mencionar que sensores convencionais tornam-se inviáveis quando aplicados para monitoramento de pontes com grandes vãos (mais de 100 metros). Os transdutores de deslocamento tradicionais só podem ser utilizados para medir o deslocamento relativo, enquanto que a Estação Total tem se mostrado inadequada para o monitoramento de grandes vãos. A solução encontrada para esse problema é o uso do Sistema de Posicionamento Global (GPS) (KO; NI, 2005).

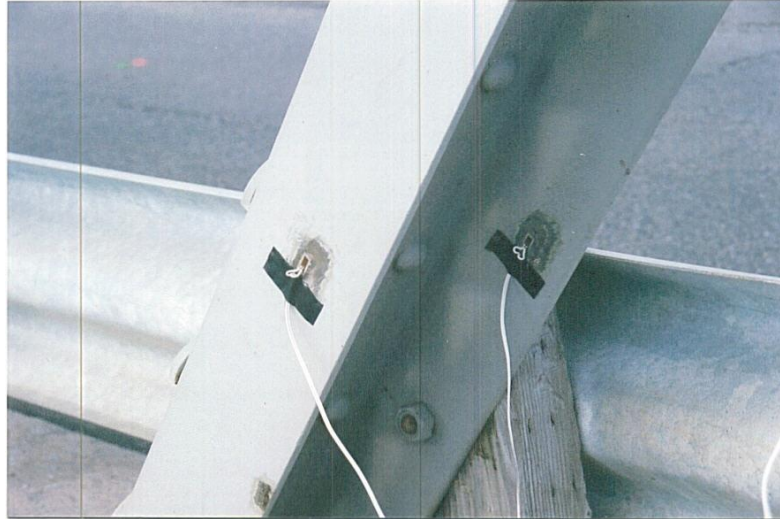
O sistema é formado por pequenos sensores que são acoplados na estrutura monitorada, e outro receptor (base) é instalado em uma local fixo (Figura 7). Cada sensor coleta informações por meio do GPS e transmite-as para a base. No final, todos os dados são processados e, o resultado apresenta a posição de cada sensor instalado na estrutura (KNECHT; MANETTI, 2001).



**Figura 7 – Funcionamento do sistema de monitoramento por GPS**  
**Fonte: KNECHT; MANETTI, 2001, p. 124 (Traduzido)**

No entanto, apesar de apresentar precisão da medida em milímetros, o uso do GPS para o monitoramento de pontes apresenta fontes de erro provenientes da troposfera e ionosfera, além de interferência nos sinais pela presença de árvores e tráfego (DA SILVA; DE MIRANDA; MONICO, 2015).

Outro método utilizado para o monitoramento de pontes é a utilização de extensômetros. O emprego desse método pode ser visto na Figura 8, onde foi conduzido um teste de carga em pontes na Província de Ontário. Os extensômetros foram instalados em elementos estruturais das pontes para monitorar deformações e tensões nos componentes estruturais da mesma. O problema encontrado neste monitoramento está na medição de deformação. Usualmente, são utilizados dois tipos de extensômetros: extensômetros elétricos e extensômetros de fio. Ambos possuem defeitos: o extensômetro elétrico é capaz de medir cargas dinâmicas, mas possui baixa estabilidade, que resulta em um desvio da medida ao longo do tempo; o extensômetro de fio, tem alta estabilidade, mas só pode medir a deformação quase-estática (KO; NI, 2005).



**Figura 8 – Extensômetros no monitoramento de pontes**

Fonte: Disponível em: <<http://www.mto.gov.on.ca/graphics/english/publications/road-talk/strain-gauges-installed-on-a-member.jpg>>. Acesso em: 11 nov. 2016

### 2.3.2 Raio X e Emissão Acústica

Segundo Pandey et al. (2012), o Raio X é indicado apenas para trabalhos laboratoriais, devido à grande quantidade de equipamentos necessários para realizar a radiografia. Para trabalhos externos, o Raio X é utilizado para encontrar obstruções (barras de aço, eletrodutos e encanamento) em estruturas de concreto, quando deseja-se reparar ou reformar parte da estrutura, mas não tem conhecimento do projeto da mesma. Esta leitura é feita por um radar que utiliza pulsos de onda de rádio de alta frequência para detectar os ecos que retornam de dentro do material, gerando uma imagem que pode ser vista na Figura 9.



**Figura 9 – Raio X**

Fonte: Disponível em: <<http://concretexrayservices.com.au/wp-content/uploads/newconcrete-xray-services1.jpg>>. Acesso em: 02 nov. 2016

Assim como o Raio X, a técnica de Emissão Acústica é bem estabelecida em ambientes laboratoriais, porém, quando utilizada em obras de grande porte, a interpretação dos resultados é, frequentemente, de difícil interpretação, além de ser propensa a interferências externas, como vibração e ruído (PANDEY et al., 2012; THOSTENSON; CHOU, 2008a).

O Sensor de Emissão Acústica (EA), é um dispositivo (“transducer”) que gera um sinal elétrico quando estimulado por movimentos da superfície em forma de onda produzida pela fonte de EA. Este sinal elétrico pode então ser amplificado e processado para proporcionar as informações sobre o evento (FERRARESI, 1996, p. 49).

Segundo Cardoso (2013), os ensaios por emissão acústica ainda estão sendo pesquisados, mas apresentam bons resultados no controle de estruturas, determinação da localização de vazamentos e de fraturas incipientes em equipamento, além de permitir monitoramento constante de estruturas industriais. Contudo, este método não informa o tamanho da fissura na estrutura, apenas informa a evolução desta.

### 2.3.3 Ultrassom

No método do ultrassom ocorre a propagação de ondas sonoras de alta frequência entre dois pontos conhecidos no material a ser analisado. A velocidade da onda varia conforme a quantidade de poros e vazios do material. Portanto, conhecendo-se o tipo de material e a espessura que a onda deve percorrer, determina-se o tempo no qual as ondas devem propagar-se pelo mesmo. Caso estas não percorram a distância predefinida no tempo previsto, conclui-se que exista alguma descontinuidade no material (LORENZI et al., 2003).

No caso particular do concreto, a relação entre velocidade de propagação de onda ultrassônica e resistência à compressão não é muito confiável, pois o número de variáveis que afetam a resistência do material é grande, incluindo, por exemplo, a relação água-cimento, o tamanho e tipo do agregado, o procedimento de moldagem, o tamanho da amostra e o tipo de cimento (LORENZI et al., 2003, p. 1).

Com base nos resultados obtidos em sua pesquisa, Lorenzi et al. (2003) analisa que a partir da utilização de ondas ultrassônicas é possível identificar a

existência de regiões heterogêneas nas estruturas. Contudo, a análise estatística não apresentou uniformidade do processo, demonstrando que os resultados obtidos no método do Ultrassom não são totalmente claros, e ainda, provocam uma difícil interpretação, como pode ser observada comparando as Figura 10 e 11, onde a Figura 10 apresenta a disposição de objetos em uma viga de um metro e a Figura 11, apresenta a leitura gerada pelo ultrassom.

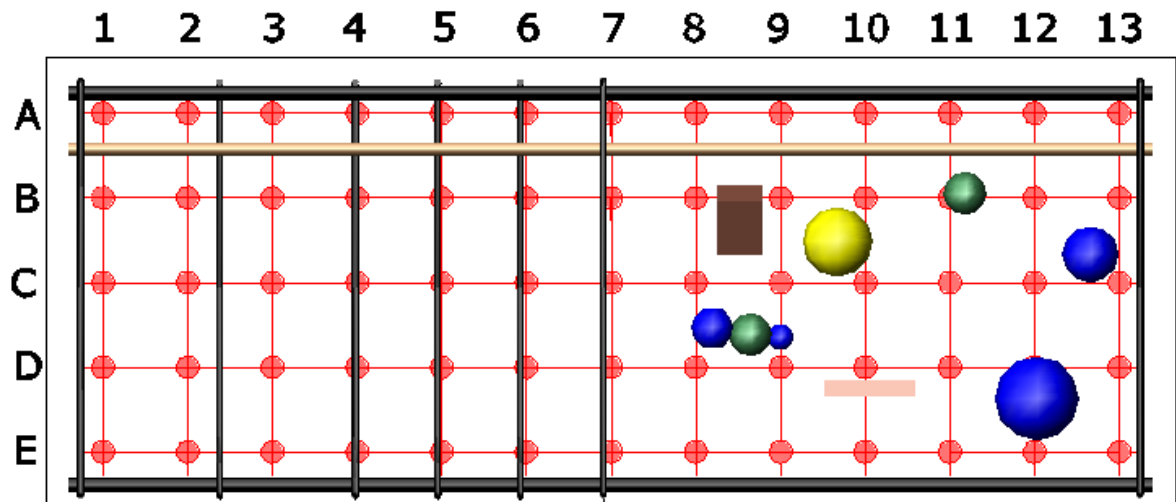


Figura 10 – Disposição dos objetos na viga e posicionamento da malha de 75 mm  
Fonte: LORENZI et al., 2003, p. 3

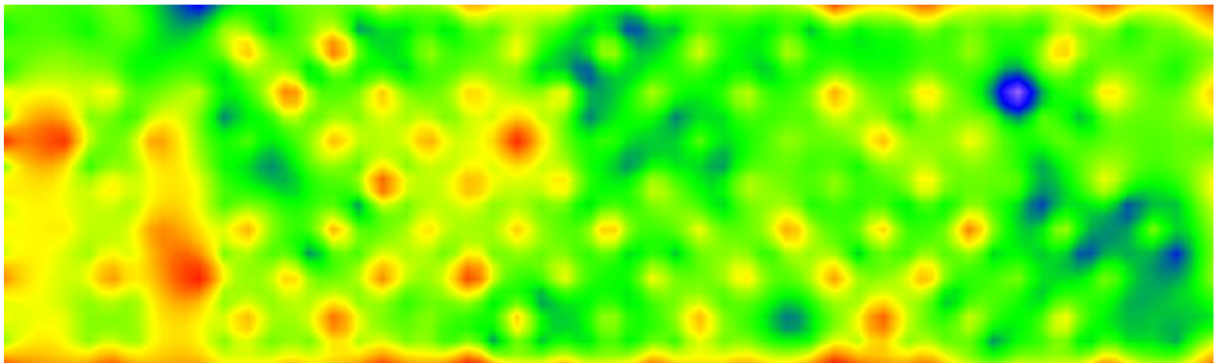


Figura 11 – Superfície de análise – Malha 75 X 75 mm  
Fonte: LORENZI et al., 2003, p. 6

Dentre as utilizações do Ultrassom, tem-se: “verificar a homogeneidade do concreto; detectar eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições; e monitorar variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (SANTOS, 2010, p. 1)”. O equipamento empregado nessas leituras pode ser visto na Figura 12.



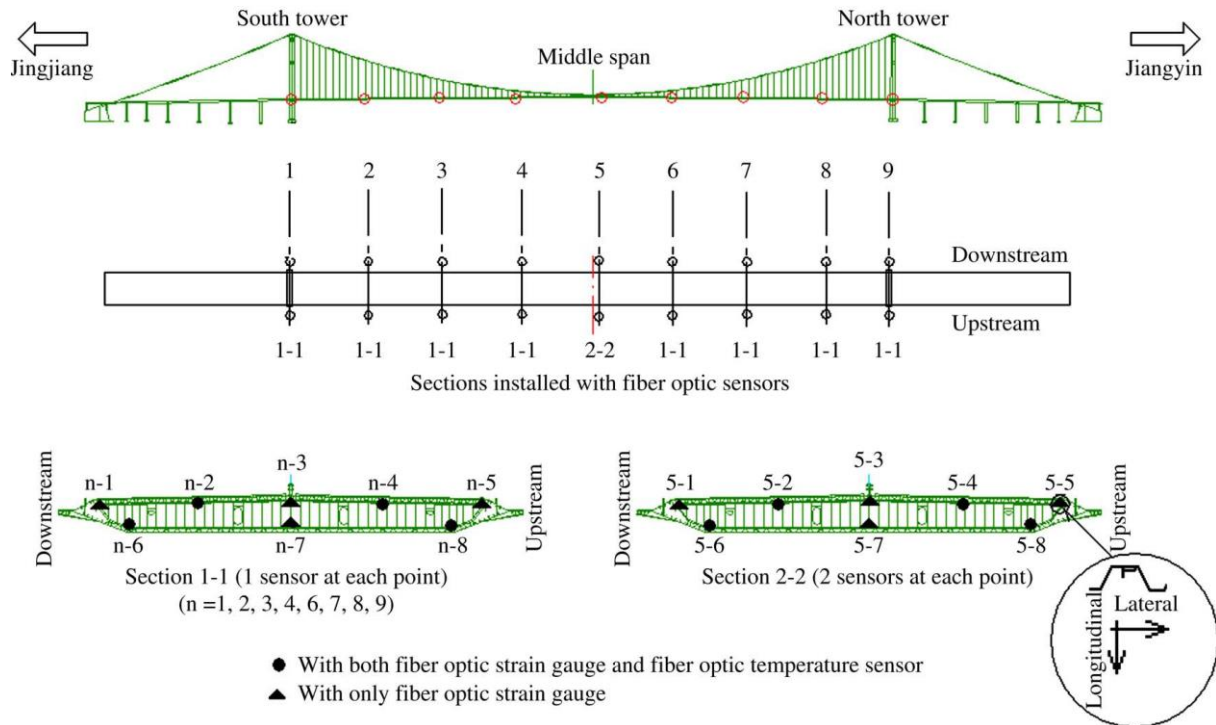
**Figura 12 – Equipamento de Ultrassom**

Fonte: Disponível em: <<http://www.bpress.cn/list/di/pic/34/237034.jpg>>. Acesso em: 11 nov. 2016

#### 2.3.4 Fibra Óptica

Desde que os engenheiros começaram a pesquisar meios para obter informações sobre o comportamento das estruturas, durante a construção ou posteriormente, sensores de fibra óptica integrados com a estrutura, que fornecem informações sobre tensão, temperatura e humidade, começaram a ser desenvolvidos (MUFTI, 2002).

A implementação desse sistema de monitoramento contínuo em pontes como: Ponte de *Qianjiang*, Corredor Ocidental de *Shenzhen*, Ponte de *Stonecutters* e Ponte de *Sutong* foi realizada junto com o processo de construção das mesmas, apesar dessa tecnologia ainda estar em processo de estudo. Na Figura 13, pode ser observado o *layout* da localização dos sensores de fibra óptica na Ponte de *Jiangyin* (China). (KO; NI, 2005).



**Figura 13 – Layout dos sensores de fibra óptica na Ponte de Jiangyin**  
**Fonte: KO; NI, 2005, p. 1718**

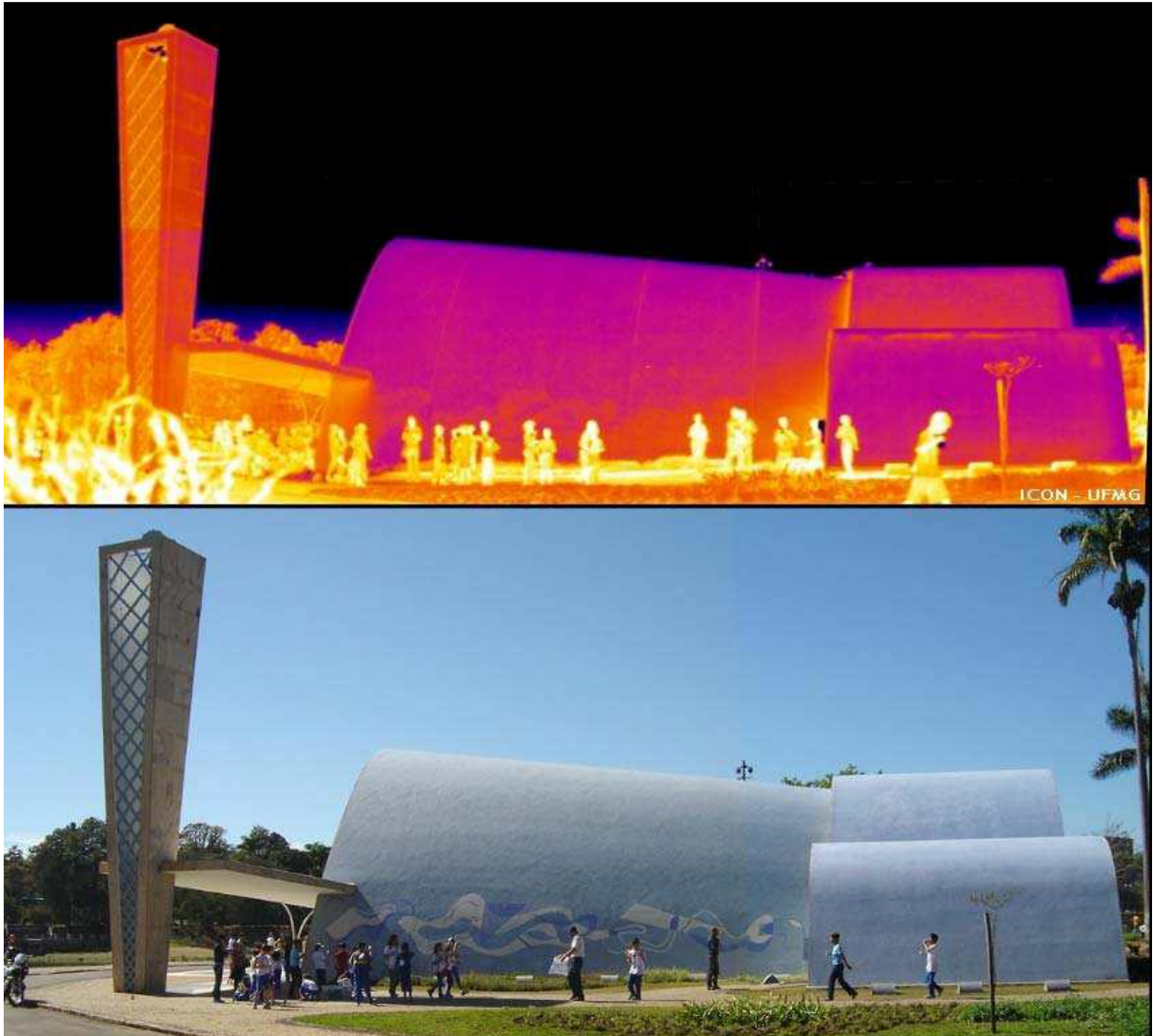
A fibra óptica, que é um dispositivo utilizado para confinar e guiar a luz, para isso emprega-se três camadas: núcleo da fibra, revestimento e capa. A maioria das fibras ópticas utilizadas como sensores possuem o núcleo de vidro de quartzo, e o índice de refração satisfaz a Lei de Snell-Descartes (é uma fórmula utilizada para descrever a relação entre o ângulo de incidência e refração da luz, quando esta passa por dois meios diferentes, como água, vidro ou ar) para limitar a propagação da luz ao longo do núcleo da fibra. Através do infoduto (aparelho utilizado para transmissão dos dados obtidos pela fibra óptica), ocorre a conversão da luz em sinais elétricos e, então, transmitidos para uma central de análise (LI; LI; SONG, 2004).

Um desafio na aplicação dos sensores de fibra óptica no monitoramento das estruturas é a medição do deslocamento das edificações em estruturas com grandes vãos, que é um parâmetro necessário para avaliar a segurança das mesmas (LI; LI; SONG, 2004).

### 2.3.5 Termografia

A termografia é realizada por câmaras térmicas e consiste na medição da temperatura em um determinado local. A radiação de calor da superfície é detectada pela câmara, que transforma o calor gerado pela estrutura em sinais elétricos que são

convertidos em uma imagem térmica (AGOSTINHO, 2012). As técnicas da termografia possibilitam a visualização da edificação em escala térmica (Figura 14), permitindo a identificação de anomalias ocultas ao olho humano (CORTIZO, 2007). Estas anomalias podem ser pontos quentes (pontes térmicas, que podem ser o motivo de uma habitação ser muito quente) ou pontos frios (que pode ser indício de infiltração em uma superfície) (AGOSTINHO, 2012).



**Figura 14 – Termograma e foto da Igreja São Francisco de Assis, 2006, Belo Horizonte, Brasil  
Fonte: CORTIZO, 2007, p. 35**

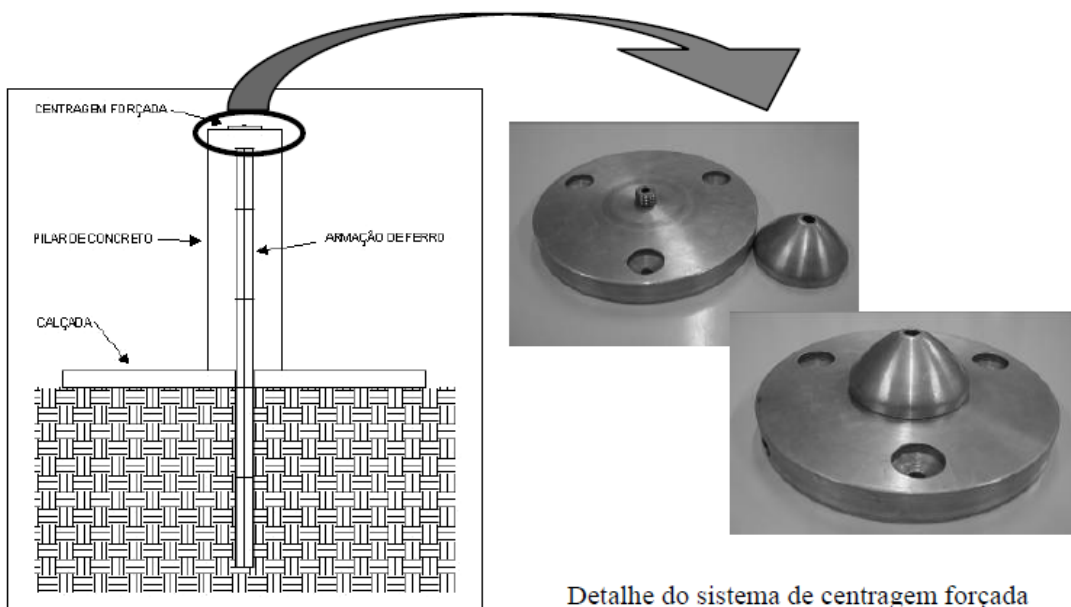
Cortizo (2007), utilizou a termografia infravermelha para a identificação de anomalias nas edificações do Patrimônio Histórico Cultural Brasileiro. Ele conclui que é possível identificar anomalias em estruturas, porém, o equipamento utilizado deve ser mantido a uma distância entre 5 m e 10 m da estrutura a ser analisada, e há orientações distintas para ambientes internos e externos. Em ambientes internos, deve-se utilizar a técnica de termografia quando a temperatura do ambiente aumenta



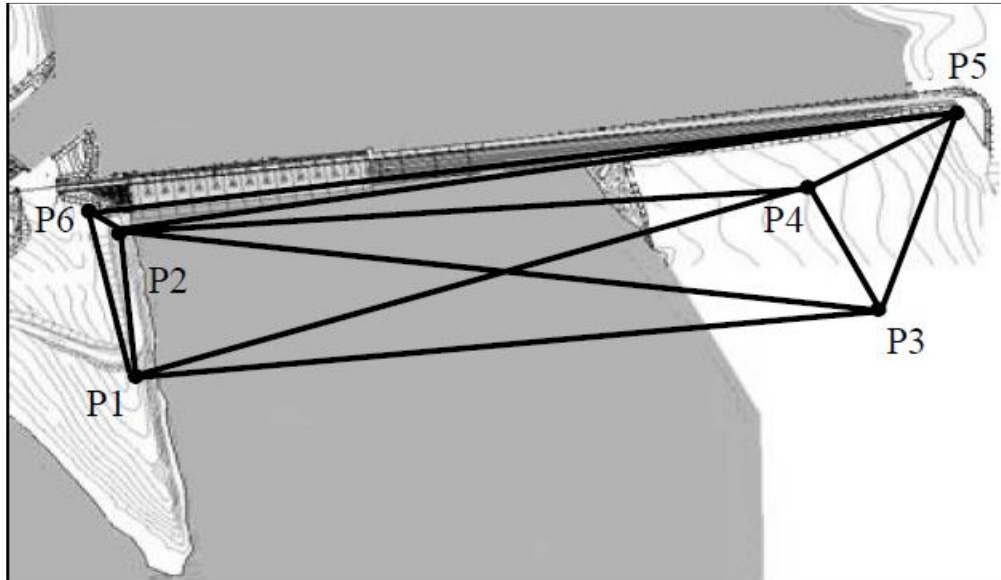
e os valores da umidade relativa do ar diminuem. Já para superfícies externas ocorre o contrário, a melhor resolução das imagens ocorre quando a umidade relativa do ar encontra-se, aproximadamente, em 80% e a temperatura da atmosfera diminui.

### 2.3.6 Técnica Geodésica

A Técnica Geodésica consiste em monitorar pontos em uma estrutura ao longo do tempo, é utilizada principalmente para o monitoramento de obras de grande porte, como barragens. Nesta técnica, são construídos marcos (pilares de concreto armado – Figura 15) dentro da área que será estudada, em pontos predeterminados pela equipe que fará o estudo. Para a escolha dos pontos é considerado a topografia do terreno, a facilidade de acesso, a estabilidade do solo e a visibilidade. Uma vez construídos, é feito o levantamento desses pontos por meio da estação total (Figura 16) (GRANEMANN et al., 2008). Este levantamento é repetido em determinados intervalos de tempo, visando equiparar as coordenadas de pontos predefinidos, e analisar se, há algum deslocamento dos mesmos, dentro de um certo nível de confiabilidade (SILVEIRA, 2003).



**Figura 15 – Esquema dos pilares de concreto – Marcos utilizados na técnica geodésica**  
**Fonte: GRANEMANN et al., 2008, p. 205**



**Figura 16 – Configuração da rede de monitoramento geodésica**  
**Fonte: GRANEMANN et al., 2008, p. 206**

Como ponto negativo, Silveira (2003) escreve que por se tratar de um processo complexo de medição, é necessário a presença de um grupo considerável de pessoas, por vários dias. Portanto, torna-se caro e difícil adotar o método geodésico como monitoramento contínuo.

Apesar do ponto negativo apresentado por Silveira, pesquisa realizada por Granemann et al. (2008), ele afirma que pelo método geodésico, o monitoramento de barragens apresenta dados precisos e válidos, com resultados dentro da margem de erro aceitável. Portanto, é confiável a implantação desses métodos para o monitoramento de desvios estruturais.

### 2.3.7 Nanotubo de carbono

Dados os métodos descritos nos itens anteriores e as suas limitações, este trabalho apresenta um estudo de metodologias experimentais com nanotubo de carbono para potencial desenvolvimento de sensores para monitoramento estrutural.

Este trabalho baseia-se em estudos feitos por Erik T. Thostenson, que vem pesquisando sobre o uso de nanotubos de carbono como sensores para o monitoramento estrutural deste o início do século XXI. Thostenson demonstra como processar os nanotubos (2006, 2008), e como aplicá-los às superfícies (2010, 2013). Apesar destas pesquisas encontrarem-se em estágios experimentais, muitas apresentam resultados positivos.

Quando finalizados, estes sensores serão “implantados na superfície” de estruturas de concreto, como uma película, que será como uma “pele sensível” capaz de identificar os danos sendo formados ou os que já existem nas mesmas. Quando desenvolvidos, espera-se que os sensores de nanotubos de carbono sejam capazes de captar micro e macro fissurações, além de poderem proporcionar leituras em tempo real das mudanças de tensão, efeitos de temperatura e formação e propagação dos danos na estrutura

## 2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Segundo Lochida e Castro (2001) a análise estatística deve idealmente fazer parte de qualquer projeto de pesquisa desde o seu início. Seu papel principal é estabelecer, objetivamente, se os resultados obtidos têm significância estatística, de acordo com limites preestabelecidos.

Visando isto, este trabalho fará uma breve análise estatística das grandezas indicadas nos subitens 2.4.1 a 2.4.6.

### 2.4.1 Média

A Média ( $\bar{x}$ ), considerada uma das medidas descritivas mais importante, é definida pela somatória de todos os valores analisados, dividido pela quantidade total da amostra ( $n$ ), como pode ser visto na Equação 02. (CORREA, 2003).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (02)$$

### 2.4.2 Desvio-padrão

O desvio-padrão apresenta a dispersão que existe em comparação à média. Portanto, quanto menor seu valor, mais confiáveis são os resultados da pesquisa, pois assim, mais próximos os dados estão da média. O desvio-padrão ( $S$ ) é determinado pela Equação 03 (CORREA, 2003).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (03)$$

### 2.4.3 Coeficiente de Variação

O Coeficiente de Variação (CV) é uma medida de dispersão utilizada para comparar o grau de concentração dos resultados de uma pesquisa em relação à média, o mesmo é encontrado através da Equação 04 (CORREA, 2003).

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \quad (04)$$

Segundo Rigonatto (2016, p. 01):

Como o coeficiente de variação analisa a dispersão em termos relativos, ele será dado em %. Quanto menor for o valor do coeficiente de variação, mais homogêneos serão os dados, ou seja, menor será a dispersão em torno da média. De uma forma geral, se o CV:

For menor ou igual a 15% → baixa dispersão: dados homogêneos;

For entre 15 e 30% → média dispersão;

For maior que 30% → alta dispersão: dados heterogêneos.

### 2.4.4 Erro-padrão

Segundo Lunet, Severo e Barros (2006, p. 55), o erro-padrão da média (SE) é:

uma estimativa do desvio padrão da distribuição das médias de amostras com o mesmo tamanho obtidas da mesma população, e dessa forma uma medida da incerteza associada à estimativa da média na população.

O erro-padrão da média é encontrado dividindo-se desvio padrão (S) pela raiz quadrada do tamanho amostral (n).

### 2.4.5 Barra de erro

Segundo Tabacniks (2003) a barra de erro, representada como uma barra horizontal ou vertical em um gráfico, serve para expressar o intervalo de incerteza dos dados em relação a uma grandeza. Assim sendo, quanto mais distante a barra de erro do ponto a ser analisado, menor será a exatidão dos resultados. O valor para a barra de erro é dado pela média das n medidas ( $\bar{x}$ ) mais ou menos ( $\pm$ ) o erro-padrão da média (SE).

#### 2.4.6 Ruído

Os dados coletados em experimentos são afetados por diferentes elementos, dentre os quais encontra-se o ruído, que além de ser um problema inevitável, afeta o processamento de dados (SÁEZ, 2015).

O ruído, composto por dados que não podem ser compreendidos e interpretados corretamente pelas máquinas, pode afetar as características intrínsecas da classificação de um problema, uma vez que a corrupção dos dados pode introduzir novas propriedades no domínio do problema (ROUSE, 2010; SÁEZ, 2015).

Por conseguinte, os dados coletados em experimentos reais nunca serão perfeitos e muitas vezes apresentarão ruídos que podem ser causados por falha no *hardware*, erros de programação e entradas de sons imperceptíveis aos ouvidos humanos (ROUSE, 2010; SÁEZ, 2015).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos para a elaboração deste trabalho.

As pesquisas podem ser classificadas como quantitativa e qualitativa. Esta pesquisa é definida como pesquisa quantitativa, que é uma maneira de atribuir números as informações coletadas, para finalmente chegar a uma conclusão. Por outro lado, a pesquisa qualitativa é caracterizada por atribuir aspectos descritivamente e não somente valores mensuráveis (FACHIN, 2011).

Como a pesquisa em questão envolve a fabricação de corpos de prova, bem como a análise de seus resultados, a mesma classifica-se, também, como uma pesquisa exploratória, obtendo como resultado final da pesquisa o método mais sensível para o monitoramento de estruturas e como o estudo visa abordar os resultados da análise dos corpos de prova entre três diferentes métodos, então a pesquisa classifica-se como um estudo laboratorial (GIL, 2002).

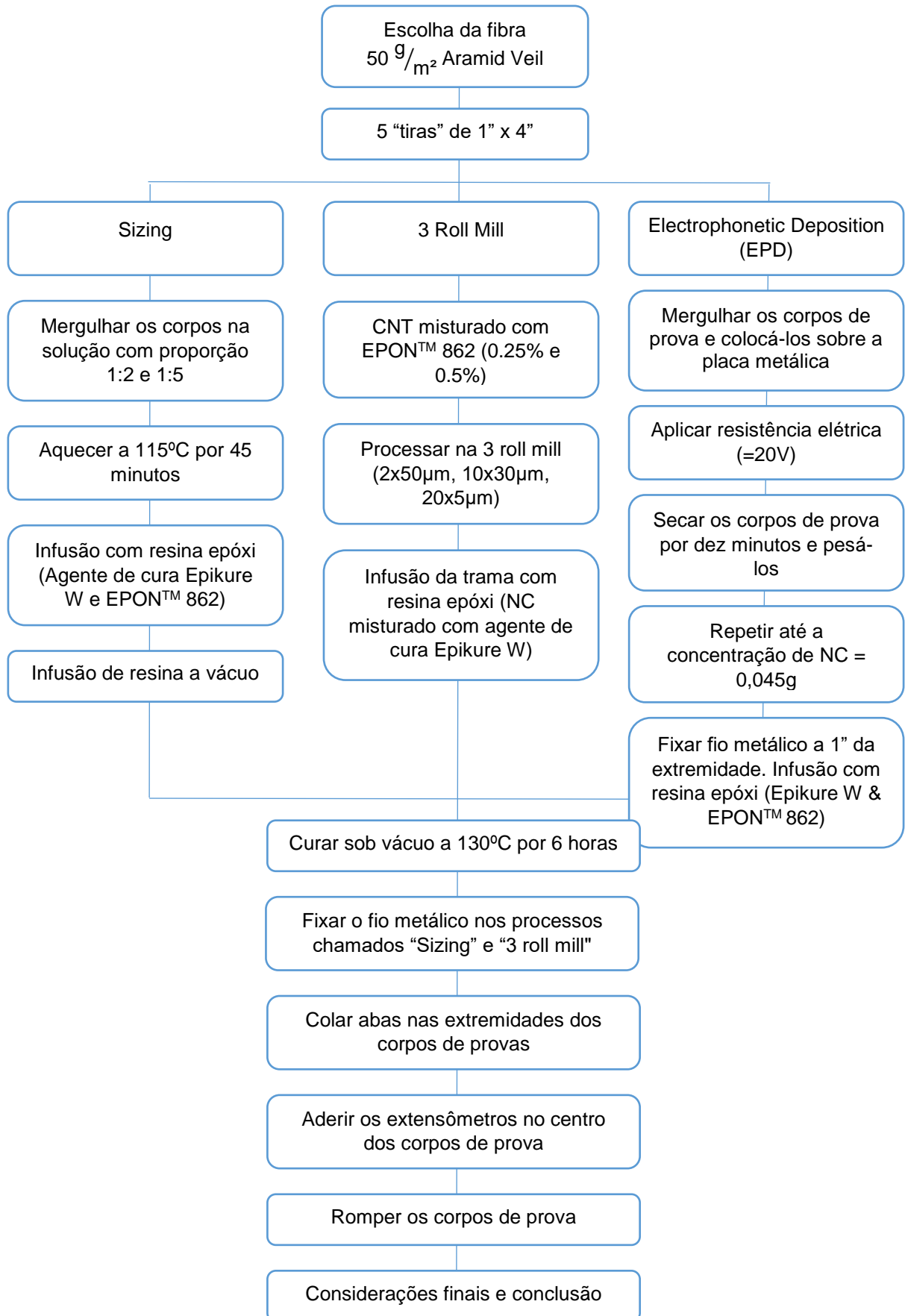
#### 3.1 ETAPAS DA PESQUISA

A pesquisa apresentada neste trabalho foi desenvolvida na Universidade de Delaware (EUA) pela presente pesquisadora durante os meses de junho, julho e agosto de 2015. Segundo Kanoun et al., (2014) os extensômetros tem uma grande variedade de aplicações na engenharia, indústrias e medicina para medições de diversas grandezas como deformação, pressão, torque e vibração. Apesar de suas notáveis funções, extensômetros convencionais apresentam algumas limitações no que abrange seus intervalos de medições, baixa sensibilidade, dificuldade em serem acoplados nas estruturas, baixa resistência à fadiga, além de ser sensível às condições do meio que o rodeia.

Visando superar as limitações levantadas por Kanoun et al. (2014), esta pesquisa tem por objetivo trabalhar as metodologias experimentais que podem ser empregadas no desenvolvimento de sensores com nanotubos de carbono para monitoramento estrutural. Entretanto, por se tratar de um estudo ainda em estado inicial de desenvolvimento, este trabalho abordará os métodos: *Sizing*, *Three Roll Mill* e *Electrophoretic Deposition*, encontrando o método mais sensível entre eles.

Por se tratar de uma pesquisa desenvolvida nos Estados Unidos da América, os corpos de prova foram medidos em polegadas. Para conhecimento do leitor, vale salientar que 1 polegada (1") equivale a 2,54 centímetros (2,54 cm). Essa pesquisa foi supervisionada pelo Professor Doutor Erik T. Thostenson. Foram definidas por Thostenson, em seus estudos, as dimensões e a quantidade de corpos de prova para cada método, a concentração de nanotubos em cada método (1:2 e 1:5 no método *Sizing*, 0,25% e 0,50% no método *Three Roll Mill* e o peso de 0,045g de nanotubo de carbono para o método *EPD*), as lacunas e a quantidade de passagens para processar a mistura de epóxi com nanotubo, a temperatura e o tempo para os corpos de prova permanecerem na estufa.

Para melhor clareza de como esta pesquisa foi desenvolvida, a Figura 17 mostra um diagrama que apresenta as etapas executadas para a obtenção dos resultados dos experimentos.

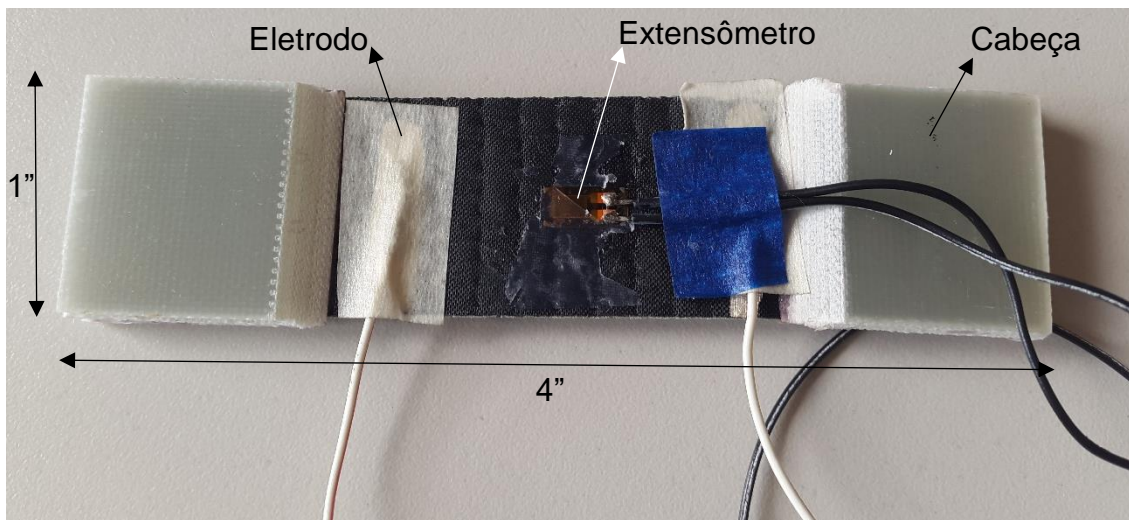


**Figura 17 – Etapas da pesquisa**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



### 3.1.1 Fabricação dos Corpos de Prova com nanotubos de carbono

Ao final da fabricação dos corpos de prova deve-se obter algo como pode ser visto na Figura 18. Os mesmos foram fabricados para serem rompidos no ensaio de tração. Eles possuem dimensões de 4" x 1", com cabeças para fixar o corpo de prova à máquina durante o teste e quatro fios acoplados: dois acoplados no extensômetro, para obter os valores de deformação, e dois acoplados diretamente no corpo de prova, para a leitura da resistência.



**Figura 18 – Corpo de prova finalizado**  
 Fonte: Autoria própria (2015)

Para os corpos de provas, foram utilizadas “tiras” com dimensões de 4" x 1" de Aramid Veil 50 g/m<sup>2</sup> (Figura 19). Foram feitos três diferentes métodos de processamento, sendo que para dois métodos (Sizing e Three Roll Mill) foram utilizadas diferentes concentrações de nanotubo de carbono. Para cada tipo de sensor (processamento/concentração de nanotubo de carbono) foram desenvolvidos cinco corpos de prova, totalizando 25 corpos de prova (Tabela 1).

**Tabela 1 – Quantidade de corpos de prova confeccionados para cada método.**

MÉTODO	CORPOS DE PROVA
<i>Sizing (1:2)</i>	5
<i>Sizing (1:5)</i>	5
<i>Three Roll Mill (0,25%)</i>	5
<i>Three Roll Mill (0,50%)</i>	5
<i>Electrophoretic Deposition</i>	5
<b>TOTAL</b>	<b>25</b>

Fonte: Autoria própria (2016)



**Figura 19 – Aramid Veil 50 g/m<sup>2</sup>**  
**Fonte: Aatoria própria (2015)**

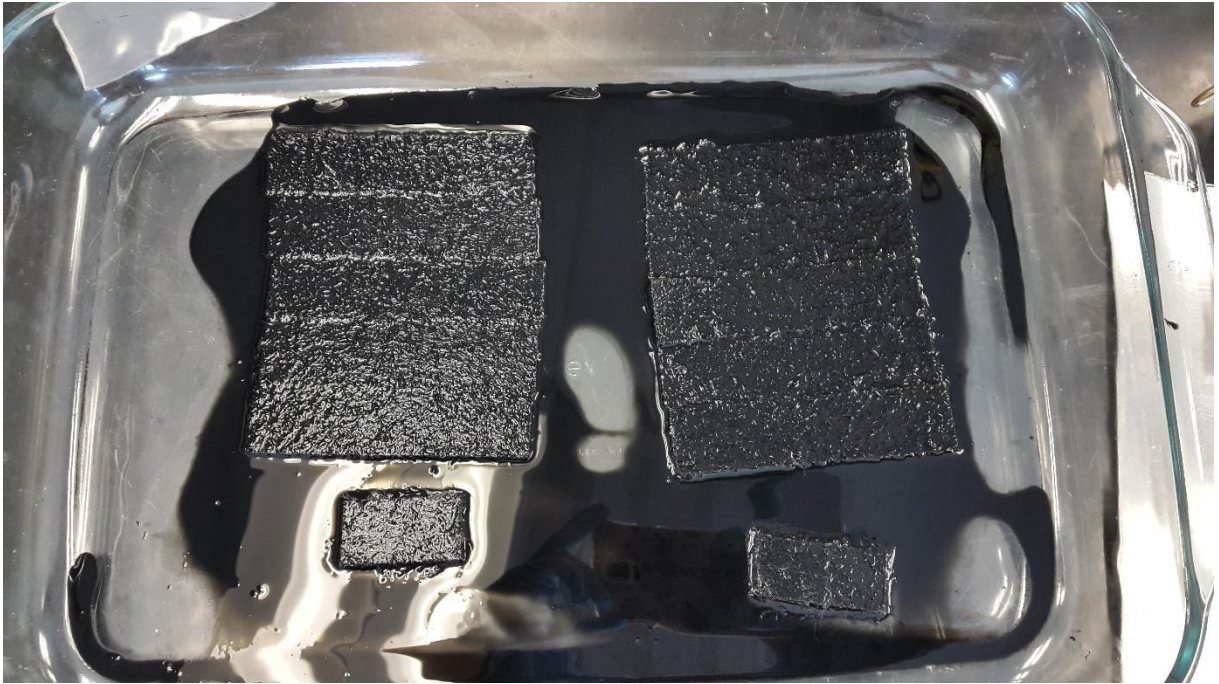
Na confecção dos corpos de provas foram utilizadas três técnicas para a deposição dos nanotubos de carbono no *Aramid Veil 50 g/m<sup>2</sup>*: *Sizing*, *Three Roll Mill* e *Electrophoretic Deposition* (EPD). A deposição, umas das principais etapas em todo o processo, é a descensão (movimento de descida) dos nanotubos de carbono, que se encontram na solução previamente preparada, para a superfície de *Aramid Veil 50 g/m<sup>2</sup>*. Como afirma Kanoun et al. (2014), a deposição é imprescindível para transferir o nanotubo de carbono a partir do seu estado inicial líquido sobre o substrato pretendido. Nesta seção será explicado como foi elaborado cada processo.

#### 3.1.1.1 *Sizing*

Dentre as técnicas utilizadas, o *Sizing* é a mais simples e de fácil execução. O nome *Sizing* é dado ao processo, pois durante o mesmo é utilizado um agente de colagem conhecido por *Sizing agent*. Em sua pesquisa, GAO et al. (2010) mostrou que quando o *Sizing agent* é aplicado nas fibras de um polímero, há uma melhora da condutividade elétrica nas fibras dos materiais compósitos.

Para a execução dos corpos de prova foi utilizado o *Sizing agent* (SIZICYL™ XC R2G, Nano-CYL). Esta solução apresenta baixa viscosidade e contém nanotubos de carbono bem dispersos. Ela foi diluída em água destilada na proporção de 1:2 e 1:5 (*Sizing agent*:água) e colocada em um recipiente retangular. Os pedaços de fibras

*Aramid Veil* 50 g/m<sup>2</sup> foram colocados dentro da solução de *Sizing* por dez minutos de cada lado, para que assim as fibras absorvessem a solução e houvesse uma deposição completa dos nanotubos de carbono nas fibras e dentro de regiões interfibras (Figura 20). As fibras embebidas na solução foram levados ao forno a 115° C por 45 minutos para secarem. Ao final da secagem, a primeira etapa desse processo foi finalizada.



**Figura 20 – Sizing**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

#### 3.1.1.2 *Three Roll Mill*

O *Three Roll Mill* é uma máquina que consiste de três rolos cilíndricos adjacentes onde cada um gira a uma velocidade diferente. O primeiro e o terceiro rolos rotacionam na mesma direção, enquanto que o rolo central rotaciona na direção oposta (THOSTENSON; CHOU, 2006), como pode ser visto na Figura 21.

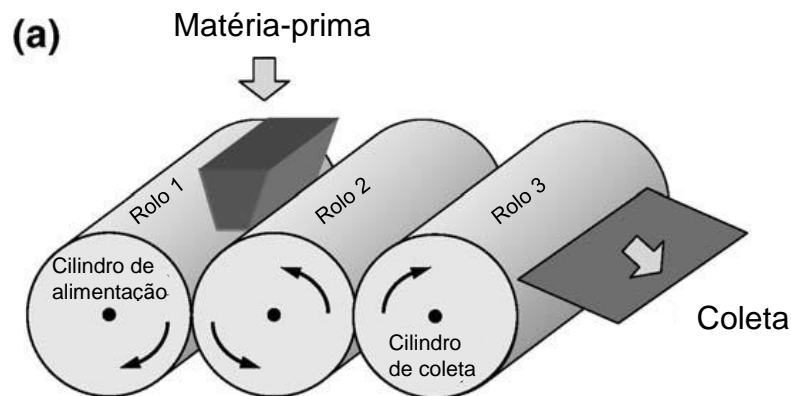


Figura 21 – Diagrama esquemático mostrando a configuração geral do *Three Roll Mill*  
 Fonte: THOSTENSON; CHOU, 2006, p. 3024 (Traduzido)

Nesta técnica foi utilizado o processo da calandragem, que é empregado comercialmente para dispersar pigmentos em tintas e cosméticos. Nesta pesquisa, este processo visa a dispersão dos nanotubos de carbono na matriz epóxi. Neste estudo foi utilizada a máquina *Three Roll Mill* (EXAKT 80 E), formada por três rolos de aço cromadas de 80 mm de diâmetro. Esta abordagem utiliza rolos cilíndricos adjacentes que rodam a velocidades diferentes para conferir tensões de cisalhamento elevadas. Os rolos apresentam velocidades angulares de  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ , e  $\omega_3$ , respectivamente. O rolo central gira três vezes mais rápido do que o primeiro rolo ( $\omega_2 = 3 \omega_1$ ) e o terceiro rolo gira três vezes mais rápido do que o rolo central ( $\omega_3 = 3 \omega_2 = 9 \omega_1$ ). Os parâmetros para o funcionamento da máquina são controlados eletronicamente, o que permite o monitoramento preciso do processo.

Thostenson e Chou (2006), em suas pesquisas, apresentam como a estrutura dos nanocompósitos se organizam conforme o processo de calandragem vai sendo executado. O pequeno espaço e a diferença da velocidade angular entre os rolos geram forças de cisalhamento, portanto quanto menor a distância entre os rolos, maior será a tensão de cisalhamento gerada, que auxiliam na dispersão das partículas na matriz epóxi.

Na pesquisa de Thostenson e Chou (2006), foi misturado um volume de nanotubos com epóxi, e essa mistura foi processada na máquina EXAKT 80 E para analisar a quantidade de passagens necessárias para a completa dispersão das partículas. Após a mistura de nanotubos de carbono com epóxi ser processada com a lacuna de 50  $\mu\text{m}$ , pode-se observar que os nanotubos de carbono ainda estão bem aglomerados (Figura 22 (a)). Nesses corpos de prova, pode ser observado que há uma grande quantidade de nanotubos de carbono aglomerado e apenas uma pequena

quantidade dispersa na matriz epóxi. Conforme a mistura é processada, cada vez utilizando menores distâncias entre os rolos, foi observado que a quantidade de nanocompósitos dispersa é cada vez maior que a quantidade de nanocompósitos aglomerados. Na Figura 22 (b) observa-se os nanocompósitos após o processamento a 20  $\mu\text{m}$ . Na Figura 22 (c), após o processamento a 10  $\mu\text{m}$ , observa-se uma redução considerável da aglomeração dos nanocompósitos. Por último, na menor lacuna possível, 5  $\mu\text{m}$  (Figura 22 (d)), nota-se que os nanocompósitos estão altamente dispersos, com pouca ou quase nenhuma aglomeração.

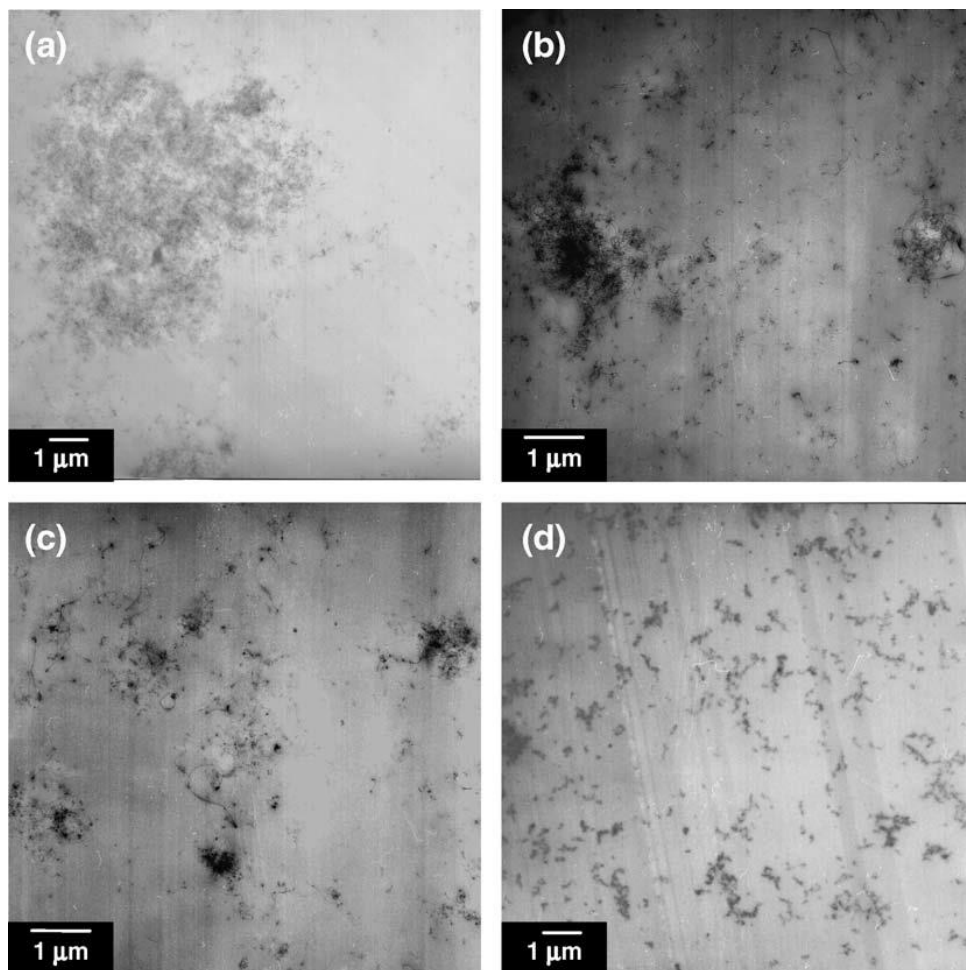


Figura 22 – Desenvolvimento da estrutura dos nanocompósitos após o processamento em diferentes espaços. (a) 50  $\mu\text{m}$ , (b) 20  $\mu\text{m}$ , (c) 10  $\mu\text{m}$  e (d) 5  $\mu\text{m}$   
Fonte: THOSTENSON; CHOU, 2006, p. 3025

Baseando no processo descrito por Thostenson e Chou (2006), os nanotubos de carbono foram misturados em uma resina epóxi líquida (EPON™ 862) a uma percentagem de 0,25% e 0,50%. Em seguida, as misturas foram processadas no *Three Roll Mill* utilizando a seguinte configuração: duas vezes na lacuna de 50  $\mu\text{m}$ ; dez vezes na de 30  $\mu\text{m}$  e vinte vezes na de 5  $\mu\text{m}$ . A mistura era colocada entre o primeiro rolo e o rolo central, e coletada por uma espátula de aço inoxidável que era

acoplada ao terceiro rolo (Figura 23). Conforme ocorria o processamento da mistura de nanotubos de carbono com epóxi, era visível que os aglomerados de nanotubos iam se segregando, aumentando a viscosidade da solução.



**Figura 23 – Processamento do nanocompósitos misturados com a resina epóxi**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

Cada vez que toda a mistura era coletada ao final do terceiro rolo, era finalizado um ciclo para a lacuna requerida. Então, o material coletado era novamente colocado entre o primeiro e o segundo rolos, assim dava-se continuidade ao processo, até que a mistura passasse todas as vezes necessárias, por todas as lacunas especificadas. Em seguida, era misturado um agente de cura (Epikure W) à solução na proporção de 26,4g/100g (relação definida pelo fabricante) e essa mistura era levada para uma máquina a vácuo (Figura 24) para que fosse removido todo o ar da mesma. Assim, foi finalizada a primeira etapa e a solução estava pronta para ser utilizada na infusão.



**Figura 24 – Mistura dos nanocompósitos com a resina epóxi na máquina a vácuo**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

### 3.1.1.3 *Electrophoretic Deposition (EPD)*

De acordo com Kanoun et al. (2014), o método mais comum para dispersar os nanotubos de carbono e para fabricar compósitos/polímeros de nanotubos de carbono é o processamento de solução. Em geral, o método de fabricação inclui a dispersão de nanotubos de carbono num meio solvente, com agitação mecânica, agitação magnética ou sonicação, misturando os nanotubos de carbono com uma solução de polímeros e a evaporação do solvente.

A agitação mecânica é o método mais popular de homogeneização. Neste processo são combinadas duas ou mais substâncias, e um misturador (Figura 25) cria movimentos de rotação da mistura no recipiente (KOPELIOVICH, 2013). A agitação magnética ocorre através de um misturador magnético (Figura 26) que tem por finalidade agitar a solução através de uma barra de agitação magnética empregando um campo magnético rotativo (PACECON, 2016). A sonicação é a conversão de um sinal elétrico em vibração sonora, sendo esta vibração responsável pela criação da força de cisalhamento que quebra as partículas encontradas na solução, transformando uma solução heterogênea em homogênea. Esse processo é feito pelos sonicadores (Figura 27).



**Figura 25 – Misturador mecânico**

Fonte: Disponível em: <<http://www.indco.com/content/images/productImages/09.11.0817.jpg>> .  
Acesso em: 03 nov. 2016



**Figura 26 – Misturador magnético**

Fonte: Disponível em: <<http://www.pacecon.net/wp-content/uploads/2016/06/987-sonication-method-alternative-magnetic-stirrer.jpg>> . Acesso em: 03 nov. 2016



**Figura 27 – Sonicador**

Fonte: Disponível em:  
<[http://cdn.bostonind.com/image/cache/data/incoming/albums/xx227/mudilik/jh4/IMG\\_7754.jpg](http://cdn.bostonind.com/image/cache/data/incoming/albums/xx227/mudilik/jh4/IMG_7754.jpg)  
<[\\_1384297055-500x500\\_0.jpeg](http://cdn.bostonind.com/image/cache/data/incoming/albums/xx227/mudilik/jh4/IMG_7754.jpg)> . Acesso em: 03 nov. 2016



Para o preparo da solução, primeiro, foram organizados os equipamentos utilizados no processo de pesagem dos nanotubos de carbono. Foi utilizado um copo de 200 ml, um Erlenmeyer com capacidade para 2000 ml e uma espátula metálica. Todos os materiais foram devidamente lavados e desinfetados com sabão neutro, após limpos foram enxaguados com água destilada para não haver contaminação dos nanotubos de carbono com o pH da água.

Para a pesagem dos nanotubos de carbono utilizou-se uma balança de precisão dentro de uma capela. O frasco com os nanotubos de carbono foi aberto dentro da capela, e no copo foi pesado duas gramas<sup>1</sup> do mesmo. Após a pesagem, foi adicionada água destilada no copo para cobrir os nanotubos de carbono, eliminando a ameaça de contato direto com o ar. Foi feita a limpeza da balança e da capela utilizando um aspirador de pó. Posteriormente, o conteúdo do copo (nanotubo de carbono + água destilada) foi transferido para o Erlenmeyer e, então, adicionou-se água destilada até completar os 2000 ml do recipiente. Por último, foi adicionada uma barra de agitação magnética dentro da solução, para que a mesma fosse agitada por vinte minutos em um misturador magnético.

Posteriormente, seguindo os passos indicados por An, Rider e Thostenson (2012) a solução foi sonicada (passou pelo processo de sonicação) por dezesseis horas sendo adicionado o gás ozônio neste período. Primeiro, o Erlenmeyer com a solução era colocado no banho de circulação com resfriamento (máquina que controla a temperatura do objeto – Figura 28), o mesmo era ligado a temperatura de 5°C, depois eram inseridos no Erlenmeyer os tubos de ozônio e os tubos de entrada e saída do sonicador. Em seguida, a bomba peristáltica (Modelo MU-D01) era ligada, e a mesma era utilizada para circular a solução com nanotubos de carbono dentro da célula do sonicador (*Sonicator Continuous Flow Cell model 800B*). Seguidamente, o sonicador de alta potência (Sonicator 3000) era ligado. Era selecionado o programa, onde o pulsar funcionava por quinze segundos e, então, permanecia parado por sete segundos. Por fim, era ligado o gerador de gás de ozônio (1000BT-12). A solução deveria permanecer rodando por 16 horas ou mais, considerando o tempo corrido no sonicador e não o tempo corrido no relógio.

---

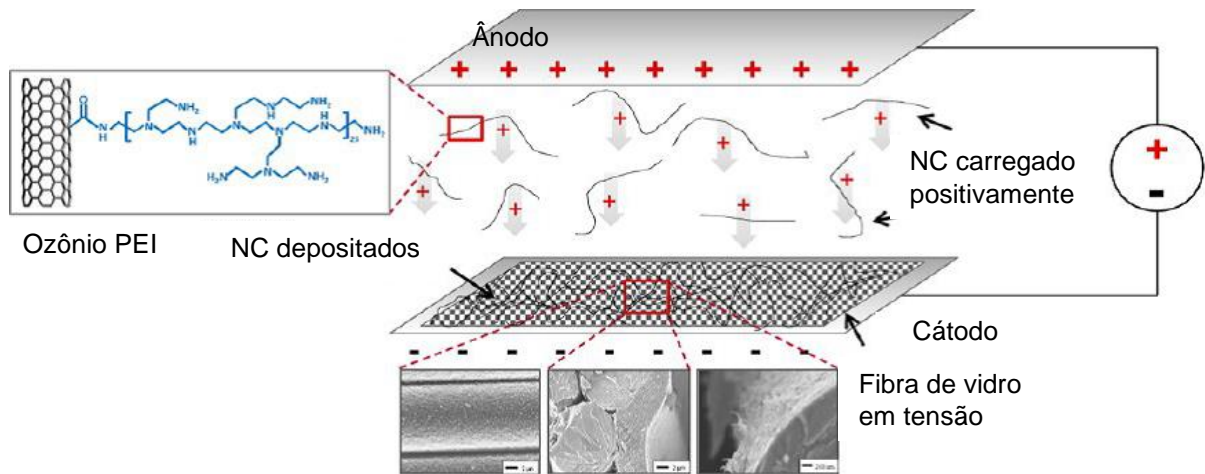
<sup>1</sup> Quantidade de 1g/l de nanotubo de carbono.



**Figura 28 – Banho de circulação com resfriamento**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

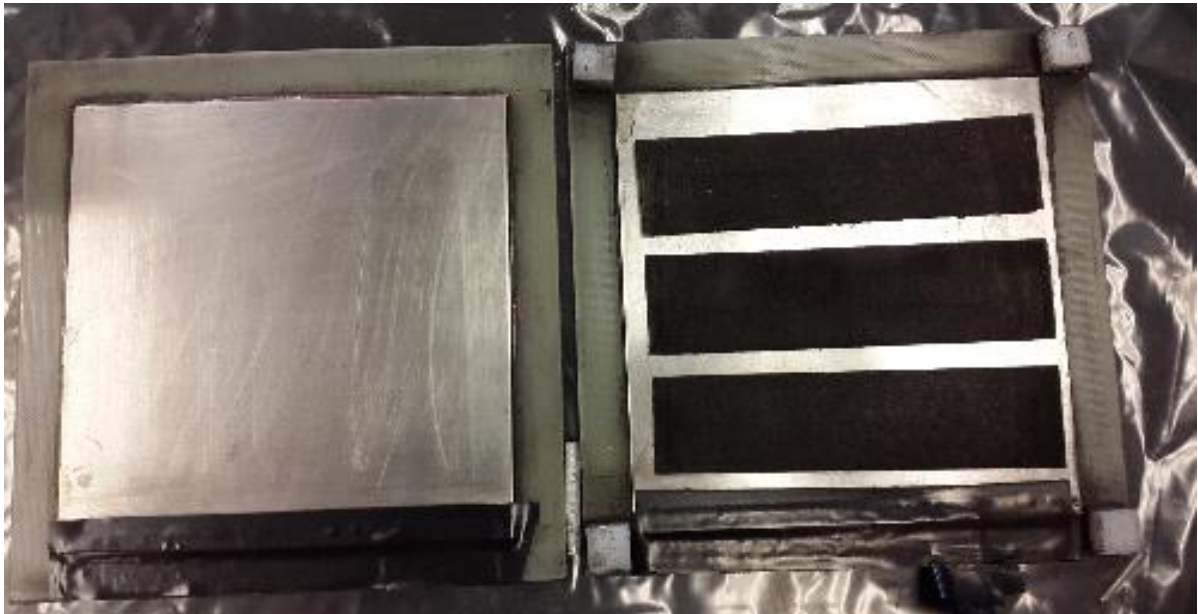
Passadas as dezesseis horas, era adicionada polietilenimina (PEI) à solução. Esse composto químico faz com que a solução fique carregada positivamente. Deve-se pesar 2,1 gramas de PEI, adicionar água destilada apenas o suficiente para cobri-lo e misturar até obter uma solução homogênea. Enfim, o PEI era adicionado e misturado à solução com os nanotubos de carbono. A solução voltava ao banho de arrefecimento, onde, nessa etapa permanecia a temperatura de 15°C. O sonicador era ligado novamente, e permanecia funcionando por quatro horas, neste momento, sem o gás de ozônio. Finalmente, era adicionado ácido sulfúrico à solução para que a mesma atingisse pH cinco. Após esse longo processo, a solução estava pronta para ser usada no processo de deposição dos nanotubos de carbono.

Resumidamente, neste processo a deposição dos nanotubos de carbono foi realizada colocando as tiras de *Aramid Veil* no cátodo e aplicando uma corrente contínua de 20V (Figura 29). Nos parágrafos seguintes, este processo será explicado detalhadamente.

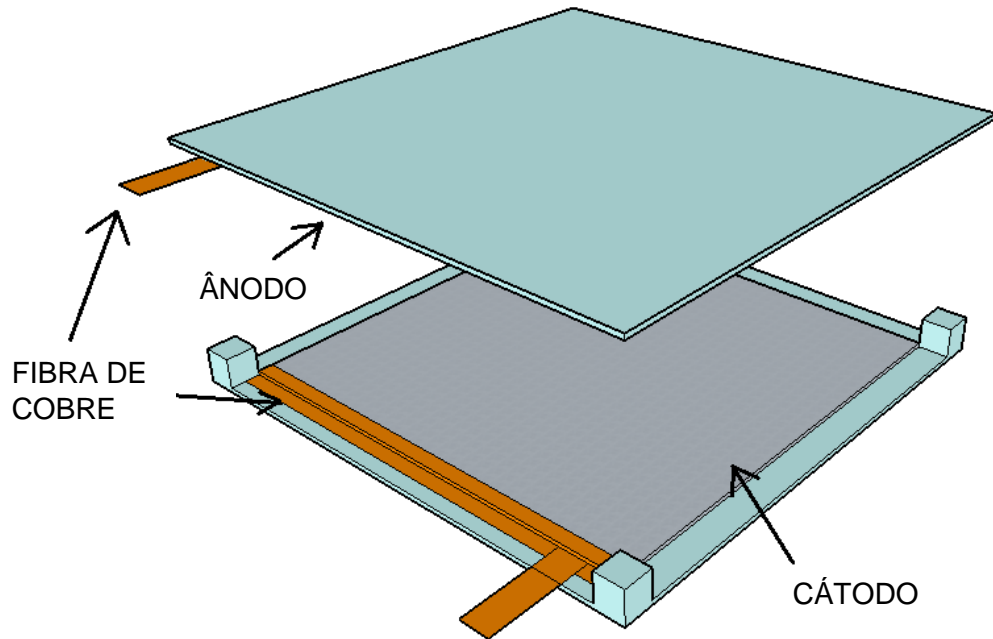


**Figura 29 – Funcionamento do EPD**  
 Fonte: AN; RIDER; THOSTENSON, 2013, p. 2023 (traduzido)

Inicialmente, as tiras de *Aramid Veil* eram imergidas na solução descrita acima para então serem posicionadas sobre uma placa metálica (Figura 30). O dispositivo utilizado no processo de EPD é formado por duas placas de plástico, nas quais são acopladas placas metálicas e nas bordas destas placas é colada uma fita de cobre (Figura 31), que atua como conector para os cabos condutores, para que haja a transferência da corrente contínua para a superfície metálica. Estas placas são distanciadas uma da outra para a criação de um campo elétrico.

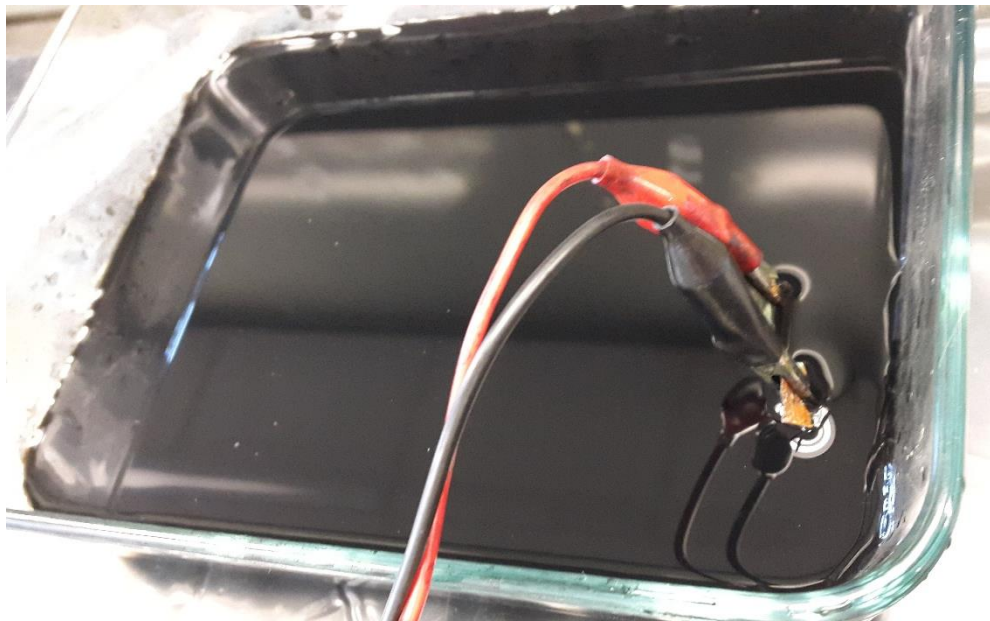


**Figura 30 – Placa metálica utilizada no processo de EPD com as tiras de *Aramid Veil* imergidas na solução de nanotubo de carbono**  
 Fonte: Autoria própria (2015)



**Figura 31 – Representação do dispositivo utilizado no processo de EPD**  
Fonte: Autoria própria (2016)

O conjunto (placa metálica e tiras) foram imergidas por completo na solução (Figura 32). Fios metálicos eram conectados às placas metálicas (o fio negativo era conectado no mesmo lado que estavam as fibras, e o fio positivo era conectado no lado oposto). Posteriormente, era aplicada uma corrente contínua de 20V por dois minutos ou menos tempo.



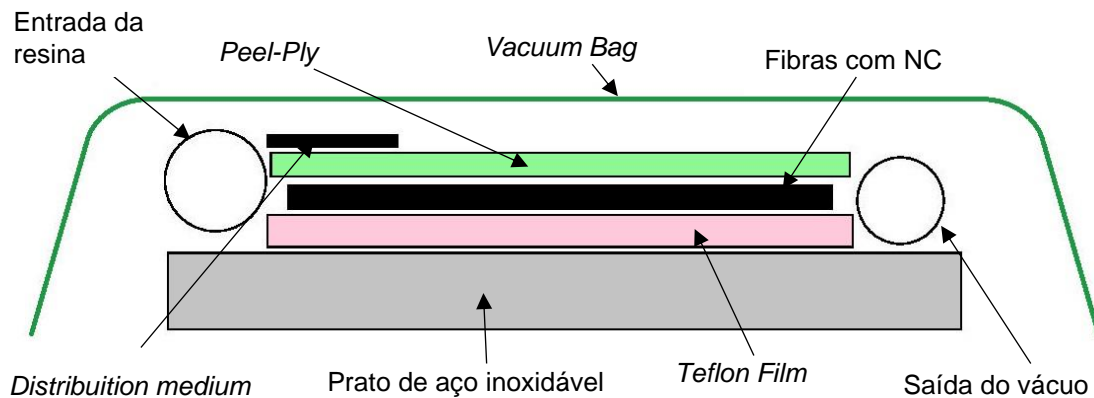
**Figura 32 – Conjunto (placa e fibras) submersos na solução de nanotubo de carbono**  
Fonte: Autoria própria (2015)

As tiras embebidas na solução eram levadas à estufa para secarem por dez minutos a 100° C, então elas eram pesadas e o processo era repetido até a concentração de nanotubos de carbono nas fibras ser próximo a 0,0450 g.

#### 3.1.1.4 Infusão da resina

A infusão da resina nas fibras, a segunda etapa no processo de fabricação dos corpos de prova, é a responsável pelas propriedades apresentadas pelos nanotubos de carbono, pois é por meio dela que forma-se uma camada ao redor do corpo de prova, que melhora a relação entre a fibra e os nanotubos de carbono (SHAH; GARDNER; ALBERDING, 2012).

A infusão da resina foi feita pelo processo *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* - VARTM (Modelagem por transferência de resina a vácuo). Este processo foi desenvolvido por Jay Randall Sayre, em 2000, e pesquisas similares foram realizadas por Xiaolan Song em 2003. O VARTM é uma técnica que utiliza vácuo para introduzir resina dentro das fibras dos materiais. A configuração do VARTM pode ser vista na Figura 33.



**Figura 33 – Método VARTM**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

Para o preparo do VARTM (infusão a vácuo), inicia-se com a aplicação do desmoldante (Frekote®) sobre uma placa de aço inoxidável. Em seguida, é colada uma fita de espuma selante (*tacky tape*) na borda desta placa. Posteriormente, o *teflon film*<sup>2</sup> é colado com uma fita adesiva para alta temperatura no espaço interno da área formada pela fita de espuma selante (corte o *teflon film* 1 ½" menor do que o tamanho

<sup>2</sup> Material utilizado para que não ocorra aderência entre as fibras e a placa de aço inoxidável.

da placa e ao colá-lo sobre a placa, deve-se cuidar para que não apareçam bolhas). Depois, as fibras com os nanotubos de carbono (*Sizing* e EPD) ou apenas as fibras (para o processo *Three Roll Mill*) são posicionadas sobre o *teflon film*. Para as fibras com nanotubo de carbono, um pedaço de fita adesiva para alta temperatura com espessura de  $\frac{1}{8}$ " é colada nas fibras a  $1\frac{1}{4}$ " das extremidades das mesmas (Figura 34). Esta fita é utilizada para garantir que não haja penetração da resina naquele intervalo, portanto possa haver a medição da resistência elétrica durante o teste.



**Figura 34 – Fita adesiva para alta temperatura colada na fibra com nanotubo de carbono**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

Posteriormente ao posicionamento das fibras, é colocado o *peel ply* sobre as mesmas, que é um pano sintético utilizado para prevenir a aderência dos sensores às outras superfícies (*distribution medium* e o filme para vácuo) e garantir uma superfície lisa aos corpos de prova após a infusão. Em seguida, o *distribution medium* (meio de distribuição, utilizado para que ocorra uma distribuição uniforme da resina nas fibras), com aproximadamente  $1\frac{1}{2}$ " ou 2" para os processos de *Sizing* e EPD e com comprimento suficiente para cobrir todas as tiras das fibras utilizadas no processo *Three Roll Mill*, é posicionado na tubulação de entrada da resina e, este conjunto, é fixado na parte superior da placa metálica. Na extremidade inferior da placa metálica, uma tubulação é acoplada para criar o vácuo e permitir que a infusão ocorra. As extremidades das tubulações são protegidas com *Breather cloth fabric* (material que previne a passagem da resina, mas impede que o filme para vácuo venha a sofrer qualquer perfuração devido a um corte mal executado na tubulação). Finalmente, todo

o conjunto é coberto com o filme para vácuo (*Vacuum bag*). Então, a bomba de sucção é acoplada na tubulação do lado esquerdo, enquanto que a tubulação do lado direito está vedada. A estrutura é colocada sob vácuo e durante a sucção do ar, deve-se pressionar a fita de espuma selante para garantir completa vedação do ar. Quando todo o ar é removido da *Vacuum bag*, o conjunto está pronto para a infusão da resina, como pode ser visto na Figura 35.

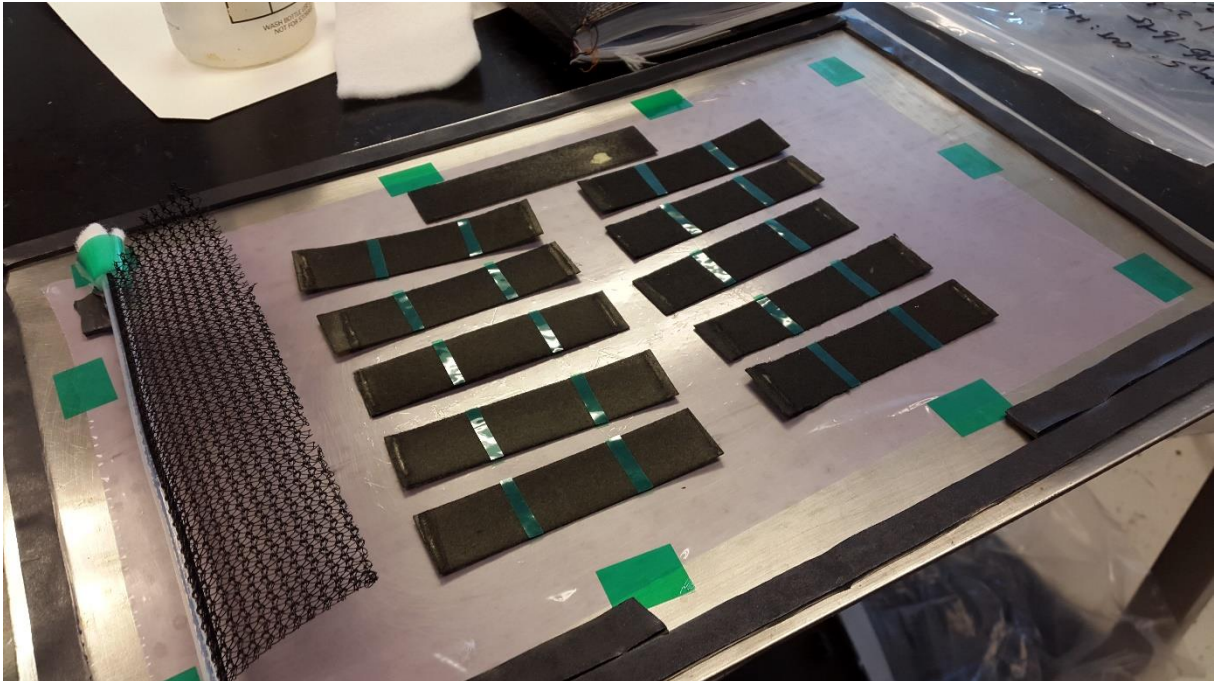


**Figura 35 – Conjunto pronto para infusão**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

A infusão é comum aos três métodos, entretanto, para cada método, a mesma apresentou pequenas modificações. Nos itens a seguir, 3.2.1.4.1 até 3.2.1.4.3, apresenta-se como ocorreu a infusão para cada método.

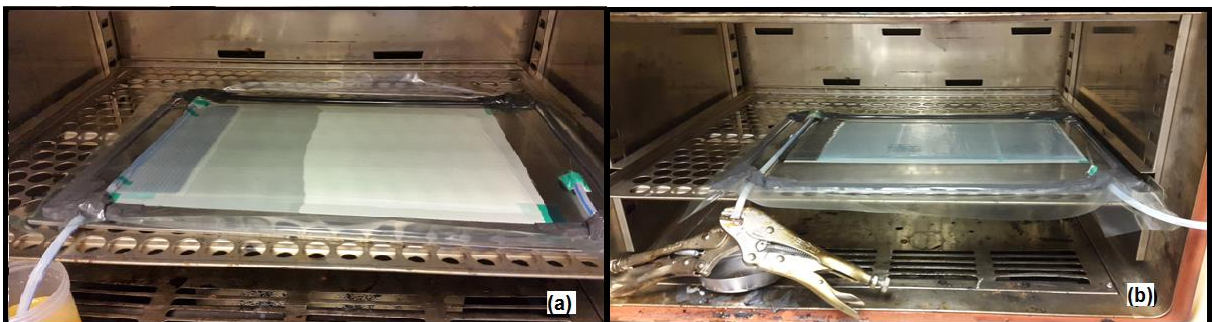
#### *3.1.1.4.1 Sizing*

Após a deposição dos nanocompósitos na fibra, conforme descrito no item 3.2.1.1, houve a montagem da placa (Figura 36). Simultaneamente, foi misturado o agente de cura (Epikure W) com epóxi (EPON™ 862) na proporção 26,4:100 (proporção definida pelo fabricante). Após a mistura estar homogênea, foi levada à máquina a vácuo para a degaseificação (retirada do ar) da mistura.



**Figura 36 – Montagem da placa com os exemplares do Sizing**  
**Fonte: Aatoria própria (2015)**

Antes que a infusão da resina começasse a ser feita, a placa pronta e a resina eram colocadas na estufa a 50° C, para que ambas estivessem na mesma temperatura. Assim que a placa e a resina atingiram a mesma temperatura, iniciou-se o processo de infusão (Figura 37 (a)). Era necessário assegurar que não houvesse a entrada de ar no momento em que a resina fosse introduzida. Assim que a infusão estava completa, a tubulação de entrada era fechada (Figura 37 (b)) e o sistema era mantido em estufa a 130° C por seis horas. A infusão será considerada completa quando a resina preencher totalmente a superfície, como pode ser observado comparando-se as Figuras 37 (a) e 37 (b).

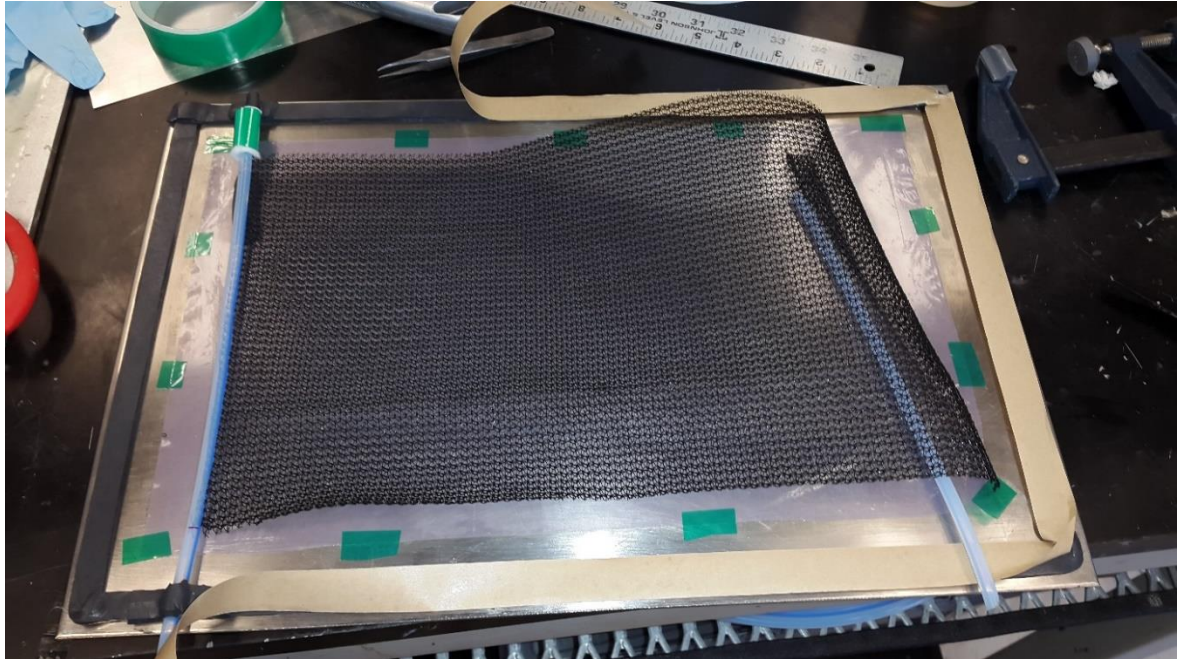


**Figura 37 – Infusão da resina**  
**Fonte: Aatoria própria (2015)**



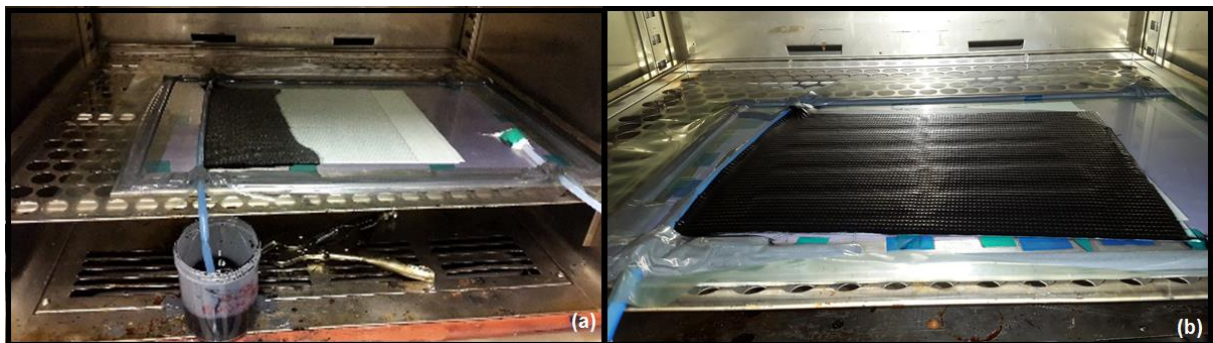
### 3.1.1.4.2 Three Roll Mill

Para a infusão dos corpos de prova do *Three Roll Mill* foram utilizadas apenas as fibras (sem os nanotubos de carbono, pois estes já estavam na resina) na montagem da *Vacuum bag* e o *distribution medium* deveria apresentar comprimento suficiente para cobrir todas as fibras (Figura 38).



**Figura 38 – Montagem da *Vacuum bag* para o *Three Roll Mill***  
Fonte: Autoria própria (2015)

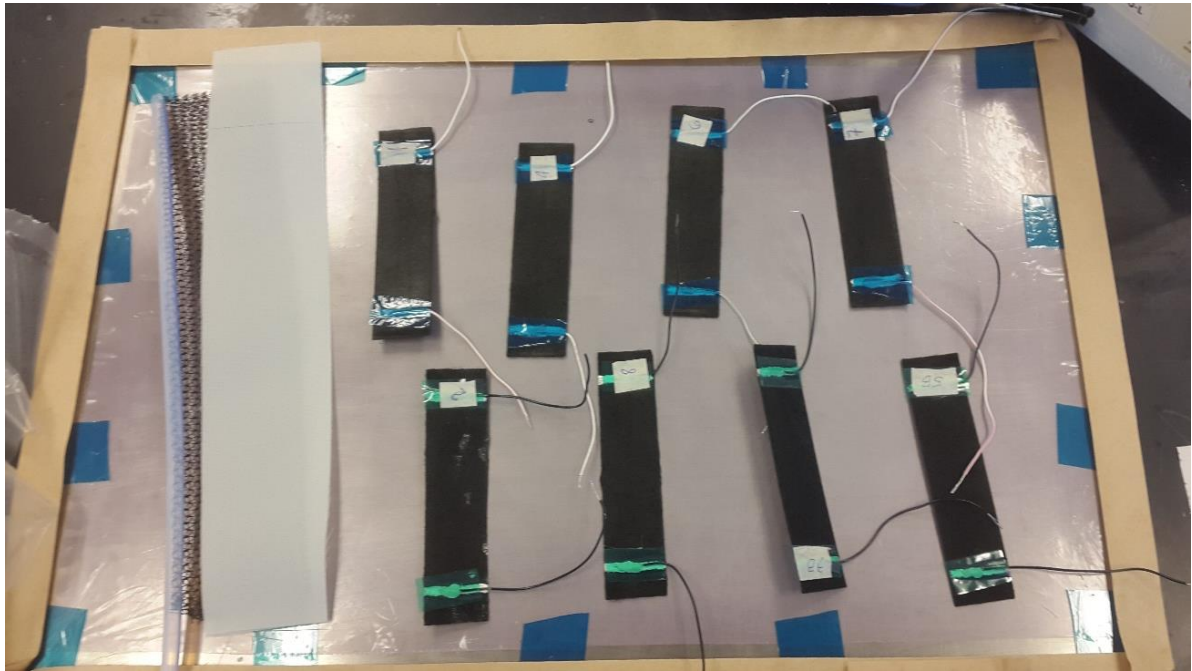
Ao finalizar o preparo da *Vacuum bag*, iniciava-se a infusão com a resina (Figura 39 (a)) que já havia sido preparada anteriormente com os nanocompósitos (item 3.2.1.2). Quando a infusão estava completa, Figura 39 (b), a *Vacuum bag* era mantida na estufa por seis horas a 130°C. A infusão será considerada completa quando a resina preencher totalmente a superfície, como pode ser observado comparando-se as Figuras 39 (a) e 39 (b).



**Figura 39 – Infusão da resina**  
Fonte: Autoria própria (2015)

#### 3.1.1.4.3 *Electrophoretic Deposition* (EPD)

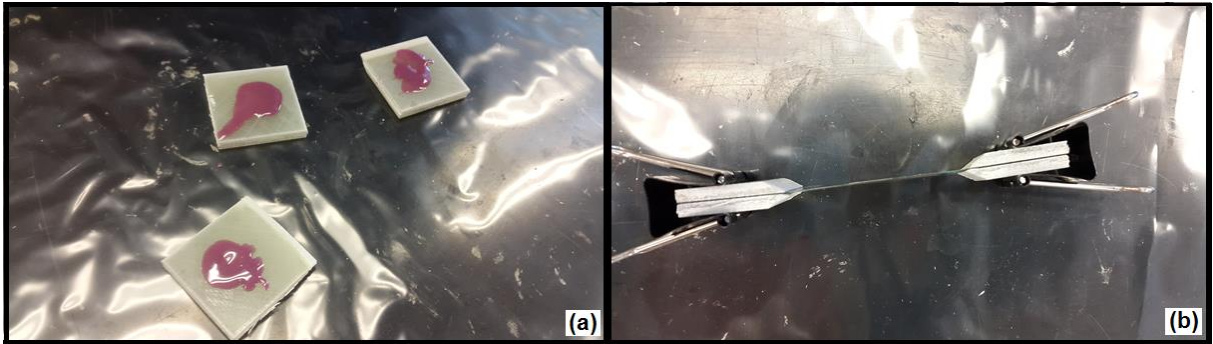
A principal diferença entre a infusão no método EPD e a infusão realizada no método *Sizing* reside nos corpos de prova, para o método EPD os mesmos já estavam com os fios para medição da corrente elétrica fixados, como pode ser visto na Figura 40 (esse processo será descrito no item 3.2.1.5). O restante do processo é o mesmo descrito no item 3.2.1.4.1.



**Figura 40 – Fio elétrico preso aos corpos de prova**  
Fonte: Autoria própria (2015)

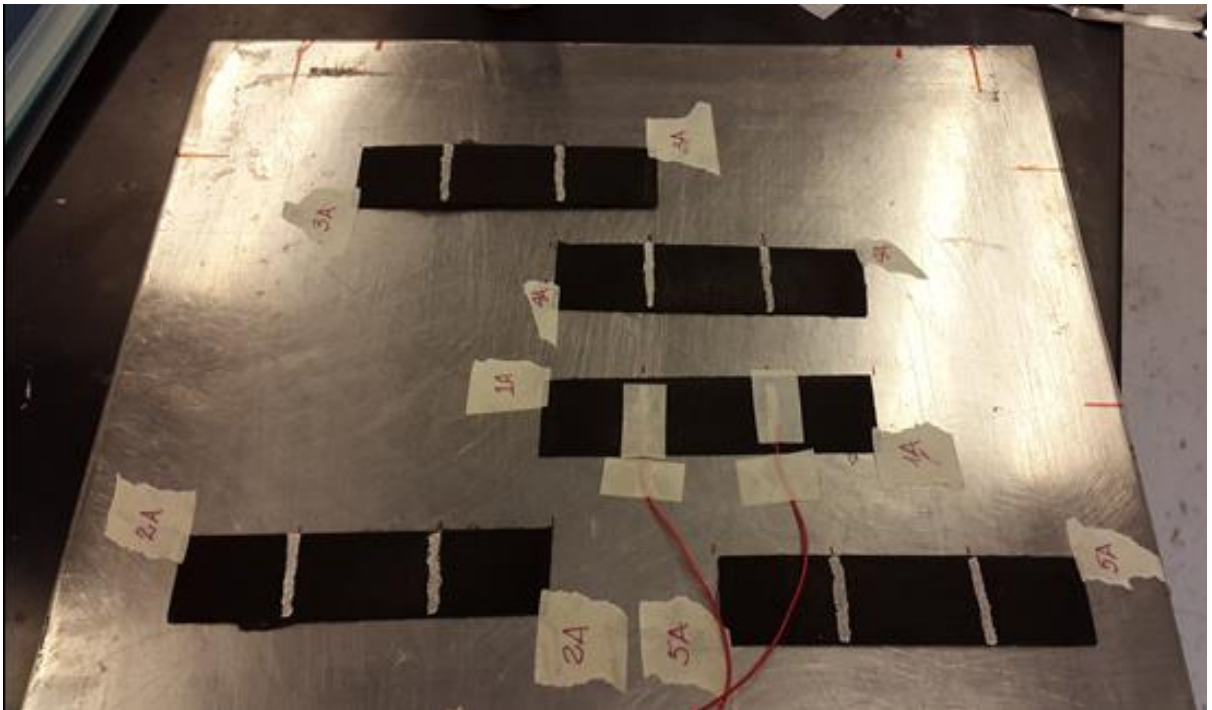
#### 3.1.1.5 Finalização dos corpos de prova

Posteriormente à infusão da resina nas fibras, placas de acrílico (1" x 1") limpas e devidamente lixadas (para melhor aderência à superfície) foram coladas nas bordas dos corpos de prova, para reduzir a concentração de tensões na interface entre o exemplar e a máquina de ensaios mecânicos, com adesivo epóxi tixotrópico (Loctite Hysol EA 934NA) (Figura 41 (a)), misturado conforme instruções do fabricante e aplicado nas placas de acrílico que foram unidas ao exemplar e mantidas sobre pressão com o auxílio de cliques de encadernação (Figura 41 (b)). Em seguida, os corpos de prova eram colocados na estufa a 100° C por uma hora, para a cura do adesivo.



**Figura 41 – Preparação dos corpos de prova**  
 (a) Placas de acrílico com adesivo epóxi tixotrópico;  
 (b) Corpo de prova com as placas de acrílico aderidas.  
 Fonte: Aatoria própria (2015).

O próximo passo na preparação dos corpos de prova foi fixar fios para fazer a leitura da resistência. Os fios eram fixados onde a fita adesiva para alta temperatura havia sido colada. Para prender os fios, primeiro uma tinta à base de prata (PELCO® *Conductive Silver Paint*) era aplicada. Em seguida, usando um adesivo condutor a base de prata (H20E EPO-TEK® *Conductive Silver-Epoxy*), os fios de resistência foram ligados aos corpos de prova, como pode ser visto na Figura 42. Mais uma vez, os corpos de prova foram levados à estufa, dessa vez a 80° C por 45 minutos.

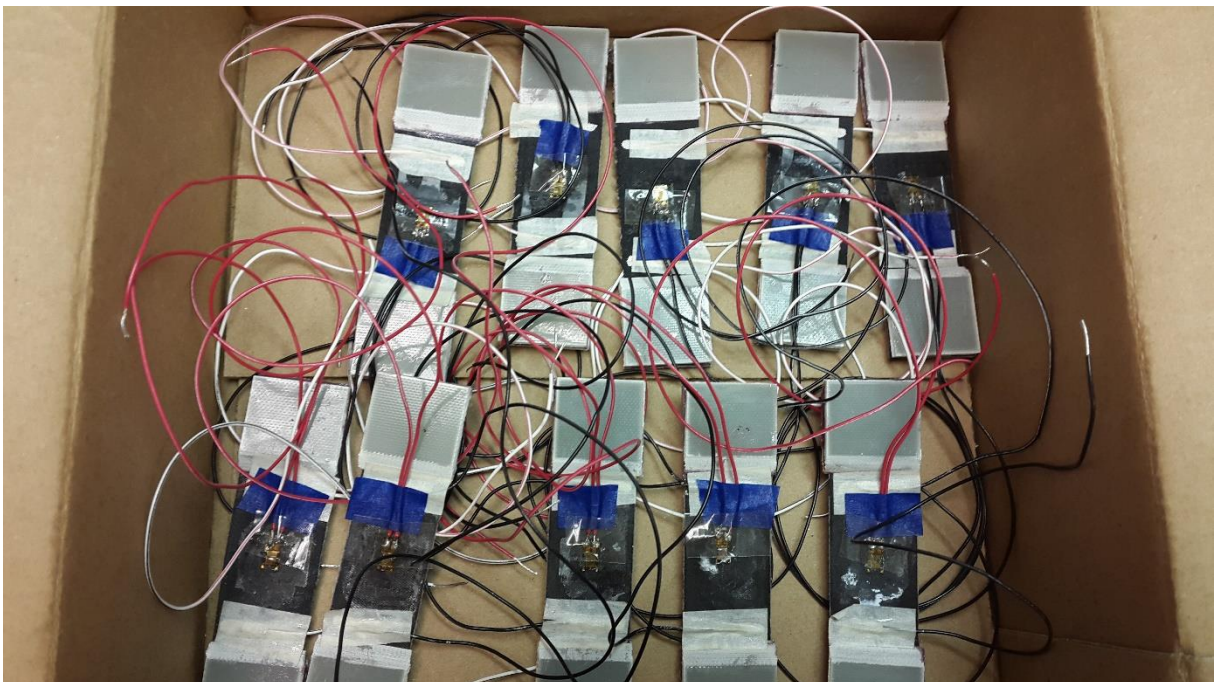


**Figura 42 – Fixação dos fios para a medição da resistência**  
 Fonte: Aatoria própria (2015)

A última fase da execução dos corpos de prova era fixação dos extensômetros (STRAIN GAUGE 350OHM LINEAR 1=5PC MMF003133), que auxiliaram na

obtenção dos valores de deformação e, por se tratar de um sistema consagrado, validaram os resultados obtidos no ensaio. Primeiro, era marcado o centro no exemplar, aonde o extensômetro seria colado. Depois era aplicado um composto de ácido-fosfórico, para acelerar o processo de limpeza. Em seguida, era aplicado um composto a base de amônia, que servia para neutralizar qualquer reação química proveniente do composto anterior. Como o extensômetro é pequeno e não deve ser contaminado pelo toque, uma fita adesiva transparente era colada no lado que seria mantido para cima, e posicionado sobre a marcação feita anteriormente. Com a fita levemente erguida, era aplicado um catalisador na face de contato do extensômetro com o corpo de prova. Posteriormente, ciacronilato (super cola) era aplicada no exemplar, e utilizando uma compressa de gaze, a fita, com o extensômetro sob ela, era pressionada por um minuto. Finalmente, a fita era retirada, deixando o extensômetro no corpo de prova.

Por último, para obter as informações geradas pelo extensômetro, era necessário acoplar fios aos mesmos por meio de solda. Primeiramente, era aplicada a solda nos terminais do extensômetro que são utilizados para soldar o fio de ligação, e, depois, era aplicada a solda, separadamente, nos fios de ligação. Então, os fios de ligação eram soldados aos terminais, e o corpo de prova estava pronto como pode ser visto na Figura 43.



**Figura 43 – Corpos de prova prontos**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

### 3.1.2 Ensaio de tração

Para finalizar a pesquisa, foram realizados ensaios de tração na Instron 5567 (Figura 44). A tração é definida como um processo físico onde uma força tangencial é transmitida através da interface do material, provocando uma possível ruptura. O ensaio de tração, é um ensaio utilizado em laboratórios, que consiste em submeter um corpo de prova a uma tensão controlada até o seu rompimento (BAYER, 2004).

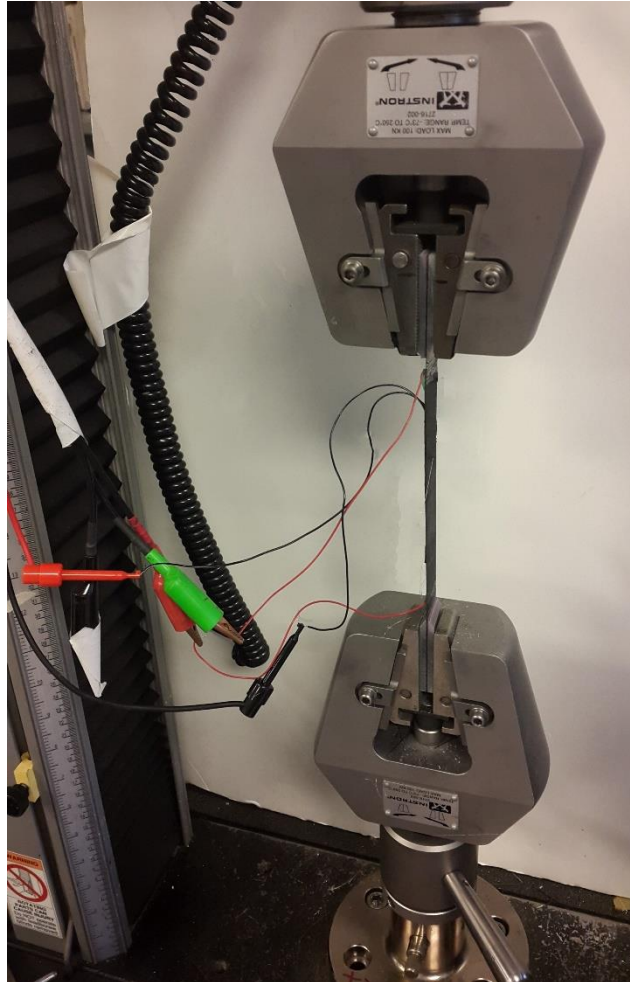


**Figura 44 – Instron 5567**

**Fonte:** Disponível em: <<http://mpri.org.by/assets/images/4otdel/instron.jpg>>. Acesso em: 20 out. 2016

Os corpos de prova foram submetidos a um carregamento gradual de 0,025 polegada/minuto até o rompimento dos mesmos. Este processo é similar ao rompimento de um corpo de prova de concreto, que sofre compressão e tem uma força aplicada até o seu rompimento, porém, como trata-se de um ensaio de tração, o corpo de prova é submetido a uma deformação positiva (ele é “esticado”) até o seu rompimento, e assim podem ser obtidos os valores de deformação do material em estudo.

Aos corpos de prova, foram acoplados quatro fios, similarmente a Figura 45, dois no extensômetro (CEA-06-125UN-350), para coletar os dados de deformação e carregamento, e outros dois no próprio corpo de prova para coletar os dados de resistência.



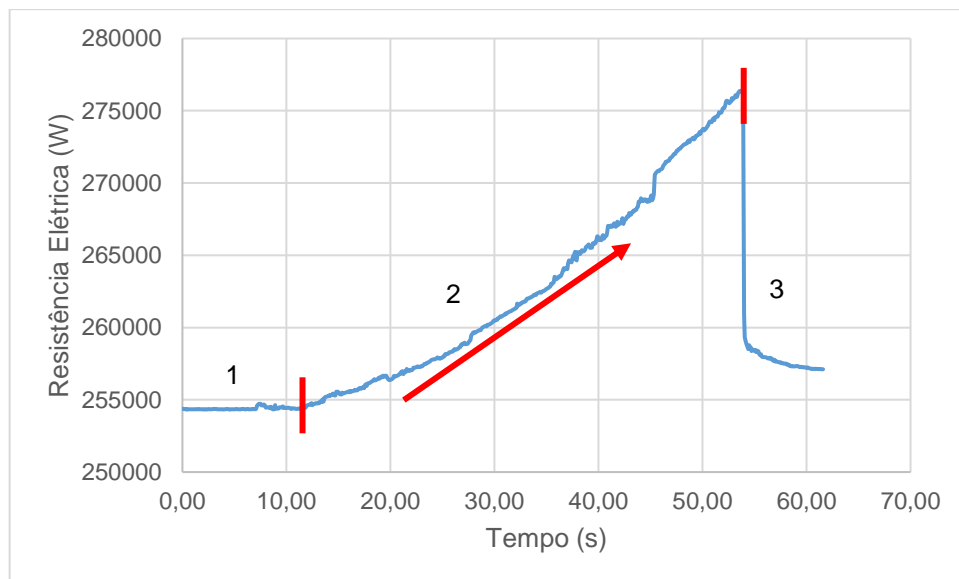
**Figura 45 – Rompimento dos corpos de prova**  
Fonte: Autoria própria (2015)

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir do rompimento dos corpos de prova, com foco no fator de sensibilidade calculado pela Equação 01. Com os resultados obtidos, foram gerados os gráficos para a obtenção do fator de sensibilidade.

### 4.1 DETERMINAÇÃO DOS RESULTADOS

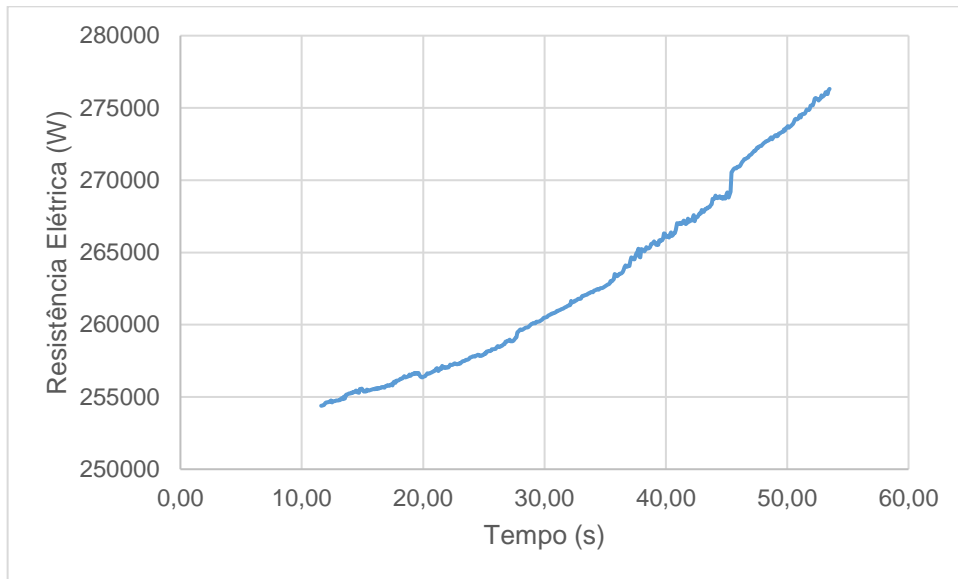
Inicialmente, foi gerado um gráfico (Gráfico 1 – Resistência Elétrica (W) versus Tempo (s)) para cada corpo de prova rompido. Nesse gráfico pode-se observar a região (1) de ruído (onde o corpo de prova estava acoplado à máquina, mas ainda não era aplicada tração ao mesmo); a região (2), onde os valores de resistência elétrica são medidos enquanto o corpo de prova estava sendo submetido a tração; e por último, a região (3), onde há o rompimento do corpo de prova.



**Gráfico 1 – Resistência Elétrica (W) versus Tempo (s)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

Em seguida, foram identificados os pontos de transição da região 1 para a região 2, e da região 2 para a região 3 nas planilhas geradas após o rompimento dos corpos de prova. Assim que definidos estes valores, todos os valores da região 1 e da região 3 foram desconsiderados, sendo mantidos apenas os dados da região 2, como pode ser visto no Gráfico 2. Apenas essa região foi utilizada para análise, pois é nela

que encontra-se a resistência elétrica medida durante o rompimento do corpo de prova.



**Gráfico 2 – Resistência Elétrica (W) versus Tempo (s) (apenas região de análise)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

O arquivo gerado durante o rompimento dos corpos de prova contém o Tempo (s), o Carregamento (libras), a Deformação e a Resistência Elétrica (W). Com estes dados foi possível fazer o tratamento dos valores da região 2 para gerar o gráfico final que é o gráfico da alteração relativa da resistência elétrica (%) versus deformação (%), e a partir do coeficiente angular da linha de tendência de uma função polinomial de 1º grau, definir o fator de sensibilidade. Apesar dos gráficos gerados pelos dados obtidos através do rompimento dos corpos de prova serem de uma função polinomial de grau maior que 1, foi utilizado a função polinomial de 1º grau para definir o fator de sensibilidade, pois o mesmo é uma equação linear, como pode ser observado na Equação 01.

O primeiro passo foi fazer com que os dados partissem da coordenada (0;0). Para tal fim, todos os valores da deformação e da resistência da região 2 foram subtraídos pelo valor encontrado no ponto de transição entre as regiões 1 e 2. E, como o eixo da ordenada é representado pela alteração relativa da resistência elétrica ( $dR/R$ ), todos os valores foram divididos pelo valor da resistência inicial. Posteriormente, houve a elaboração dos gráficos, aos quais adicionou-se a linha de tendência e, por último, uma função polinomial de 1º grau para, a partir de seu coeficiente angular, encontrar o fator de sensibilidade de cada método.



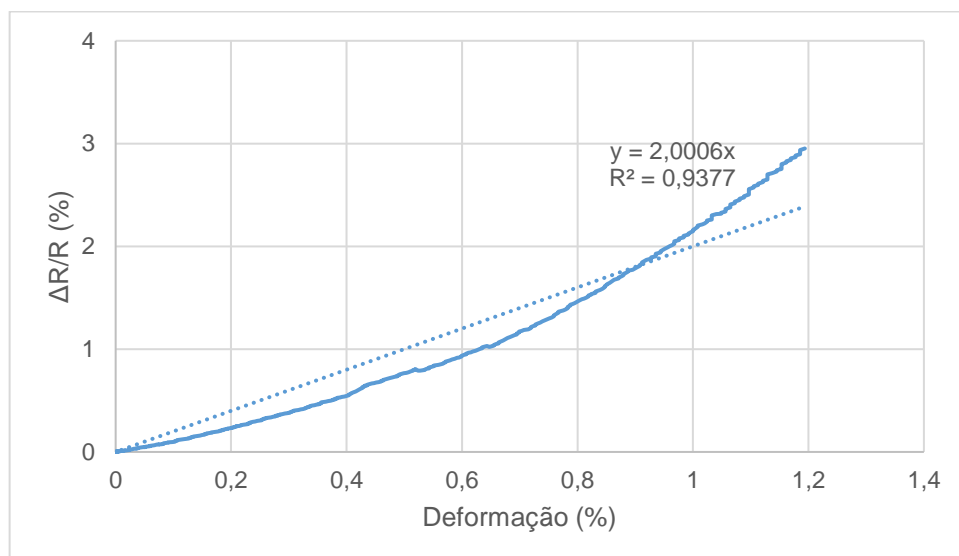
Nas seções 4.2 até 4.4, serão apresentados os gráficos obtidos primeiro individualmente, para melhor compreensão dos mesmos, e depois todos os gráficos de cada método junto, para comparação entre os mesmos.

## 4.2 SIZING

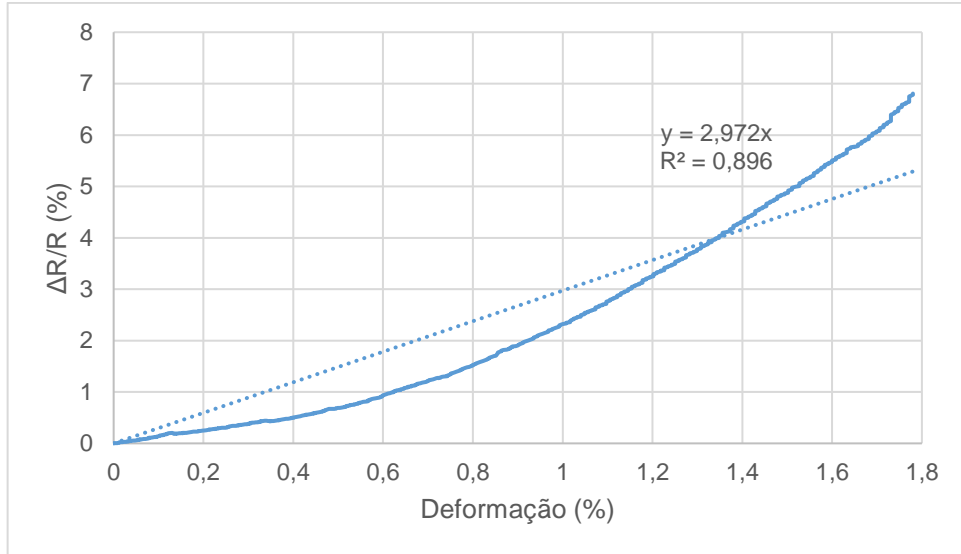
Nesta seção, serão apresentados os gráficos obtidos pelo rompimento dos corpos de prova feitos pelo método *Sizing*.

### 4.2.1 *Sizing* 1:2

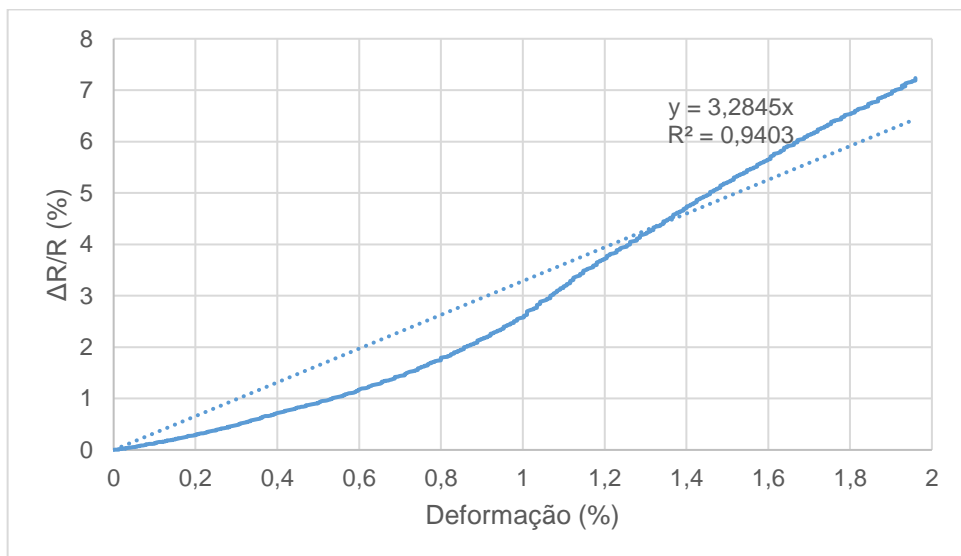
Nesta seção são apresentados os gráficos obtidos a partir do rompimento dos cinco corpos de prova do método *Sizing* com a concentração 1:2 (*Sizing agent*:água). Os Gráficos 3 a 7 apresentam a relação da alteração relativa da resistência elétrica ( $\Delta R/R$ ) versus a deformação. Junto a estes gráficos é apresentada a linha de tendência com a função polinomial de 1º grau, pois o seu coeficiente angular é o fator de sensibilidade, principal objetivo da pesquisa. No Gráfico 8, são apresentados todos os gráficos gerados após o rompimento dos corpos de prova, para que o leitor possa compará-los e, observar que não há grande divergência entre os mesmos. Ao final, da seção é apresentada a Tabela 2, com o número de cada corpo de prova, e o seu respectivo fator de sensibilidade, bem como a média, o desvio-padrão, o coeficiente de variação e o erro-padrão, para a posterior comparação entre os métodos.



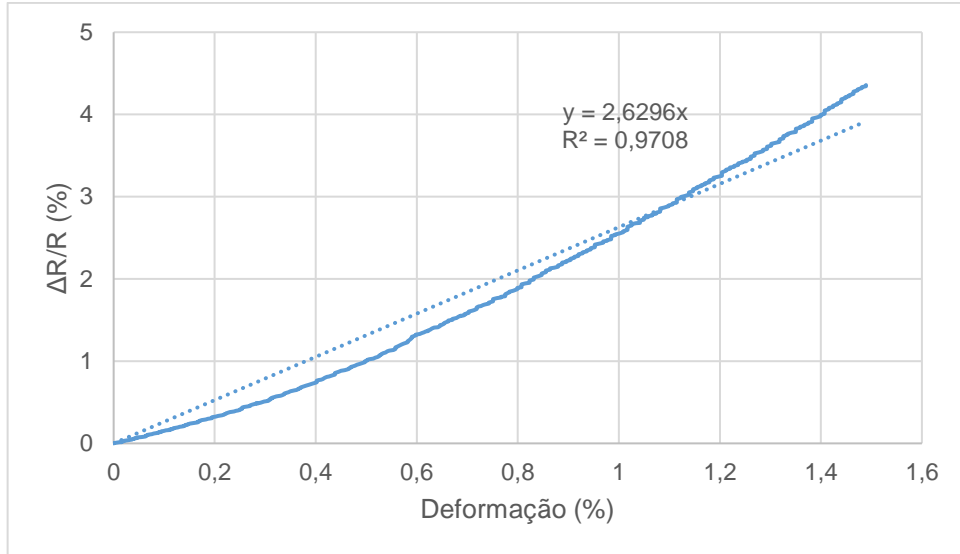
**Gráfico 3 – *Sizing* 1:2 (corpo de prova 1)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



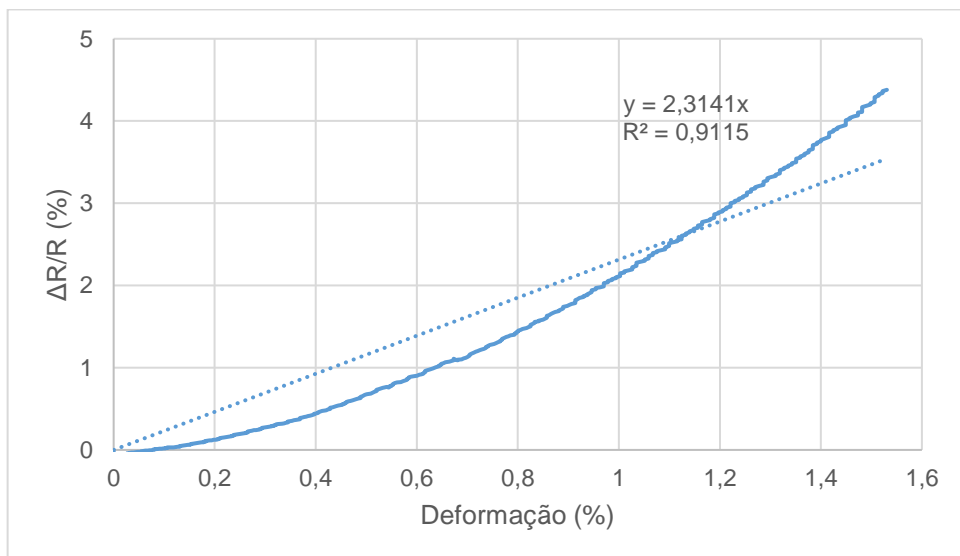
**Gráfico 4 – Sizing 1:2 (corpo de prova 2)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



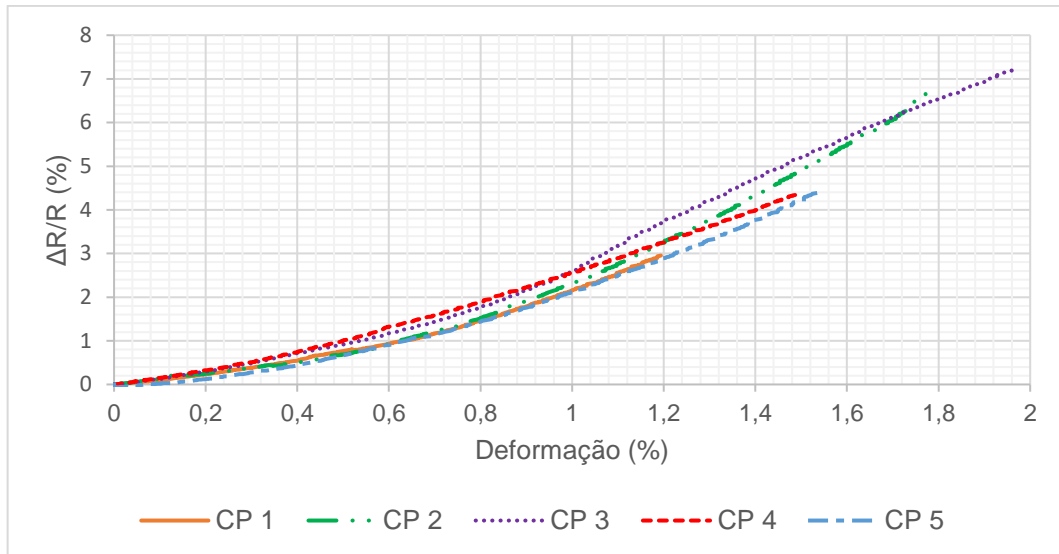
**Gráfico 5 – Sizing 1:2 (corpo de prova 3)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Gráfico 6 – Sizing 1:2 (corpo de prova 4)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Gráfico 7 – Sizing 1:2 (corpo de prova 5)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Gráfico 8 – Sizing 1:2**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

**Tabela 2 – Sizing 1:2**

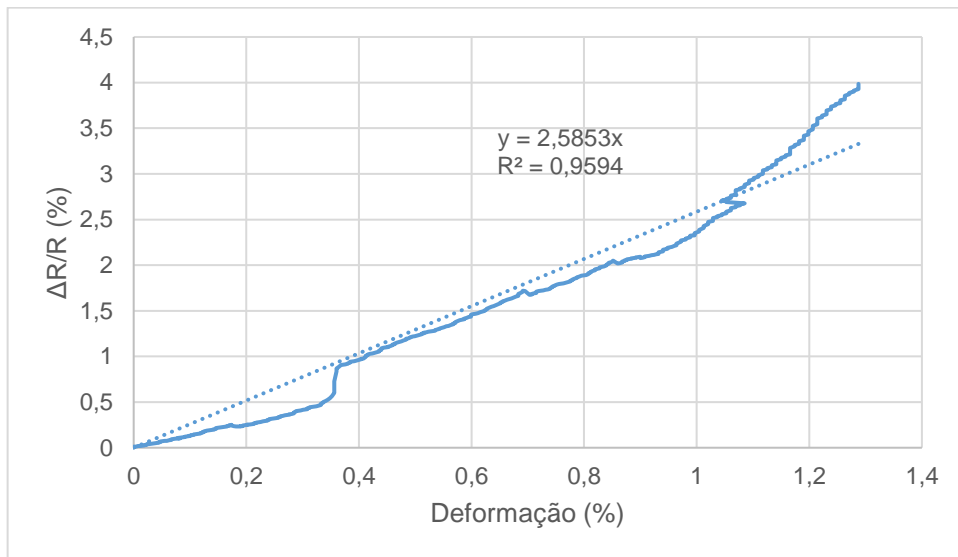
Corpo de prova	Fator de Sensibilidade
1	2,00
2	2,97
3	3,28
4	2,63
5	2,30
<b>Média</b>	2,64
<b>Desvio-padrão</b>	0,51
<b>Coefficiente de Variação</b>	19%
<b>Erro-padrão</b>	0,23

**Fonte: Autoria própria (2016)**

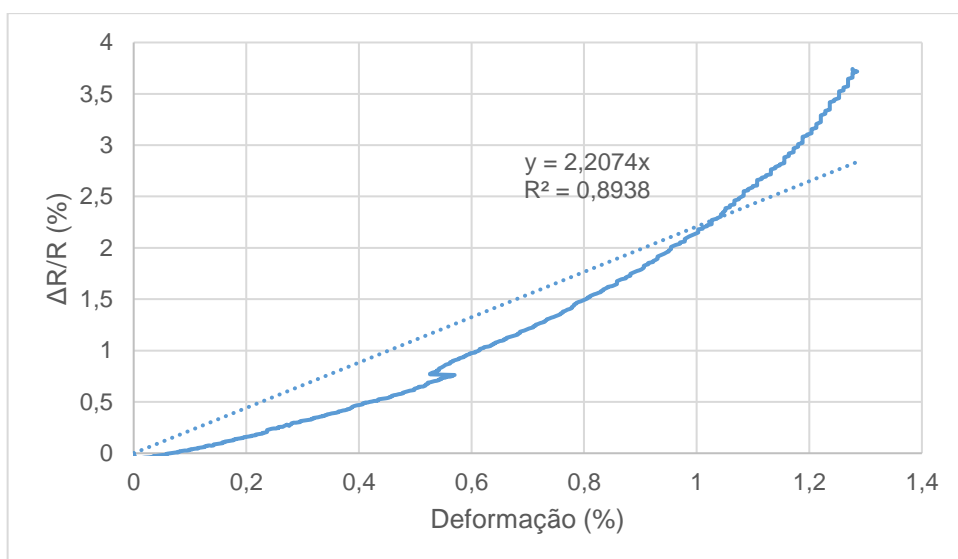
#### 4.2.2 Sizing 1:5

Nesta seção são apresentados os gráficos obtidos a partir do rompimento dos cinco corpos de prova do método *Sizing* com a concentração 1:5 (*Sizing agent*:água). Os Gráficos 9 a 13 apresentam a relação da alteração relativa da resistência elétrica ( $\Delta R/R$ ) versus a deformação. Nos Gráficos 9 e 10, observa-se uma falha na continuidade das curvas geradas. No Gráfico 9, a primeira descontinuidade pode ser atribuída a um fissuramento que o corpo de prova sofreu, porém, não o suficiente para caracterizar o rompimento em si. A outra descontinuidade observada é atribuída ao ruído gerado pela máquina, a mesma explicação é atribuída à descontinuidade gerada no Gráfico 10. Junto a estes gráficos é apresentada a linha de tendência com a função

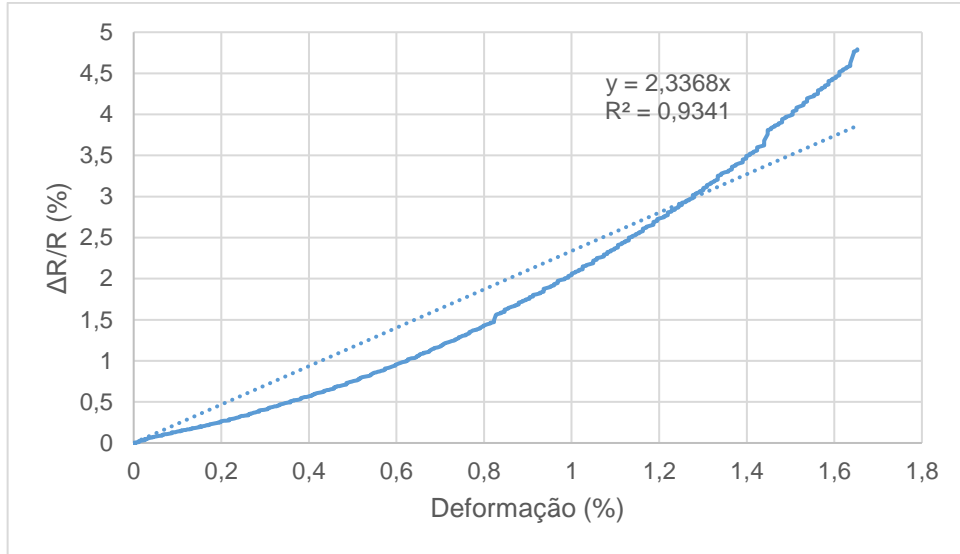
polinomial de 1° grau, pois o seu coeficiente angular é o fator de sensibilidade, principal objetivo da pesquisa. No Gráfico 14, são apresentados todos os gráficos gerados após o rompimento dos corpos de prova, para que o leitor possa compará-los e, observar que apesar do CP1 (corpo de prova 1) apresentar divergência, os demais corpos de prova não apresentam considerável divergência entre eles. Ao final, da seção é apresentada a Tabela 3, com o número de cada corpo de prova, e o seu respectivo fator de sensibilidade, bem como a média, o desvio-padrão, o coeficiente de variação e o erro-padrão, para a posterior comparação entre os métodos.



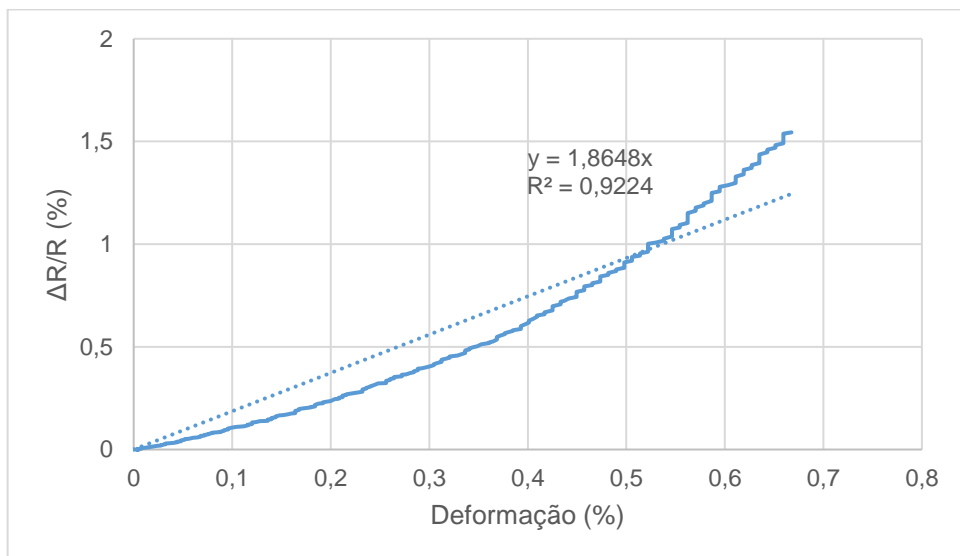
**Gráfico 9 – Sizing 1:5 (corpo de prova 1)**  
 Fonte: Autoria própria (2016)



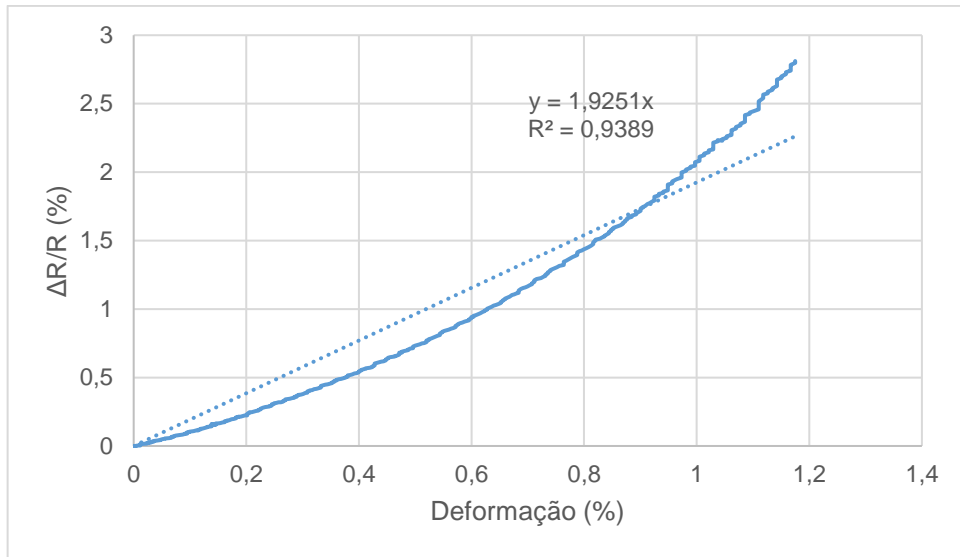
**Gráfico 10 – Sizing 1:5 (corpo de prova 2)**  
 Fonte: Autoria própria (2016)



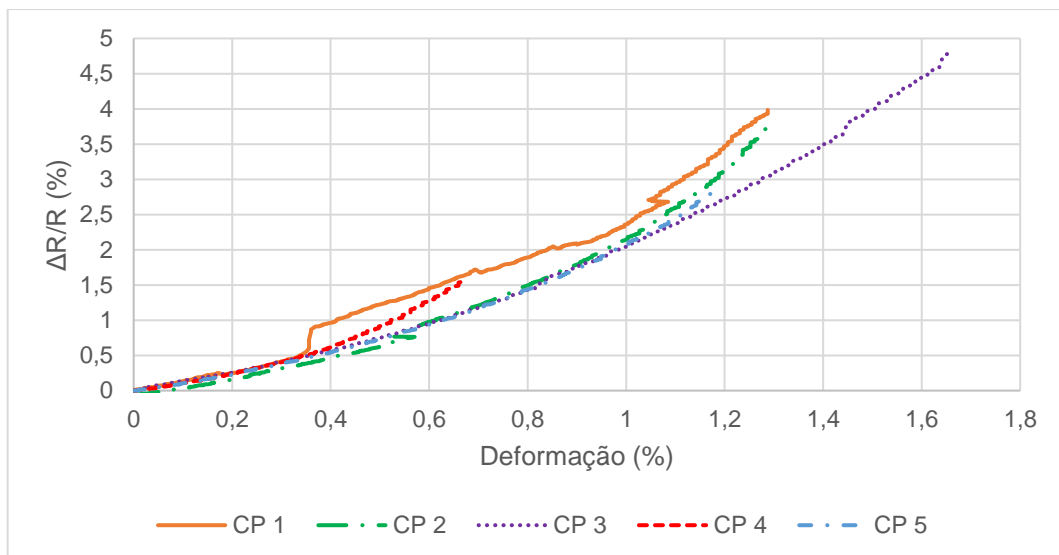
**Gráfico 11 – Sizing 1:5 (corpo de prova 3)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Gráfico 12 – Sizing 1:5 (corpo de prova 4)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Gráfico 13 – Sizing 1:5 (corpo de prova 5)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Gráfico 14 – Sizing 1:5**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

**Tabela 3 – Sizing 1:5**

Corpo de prova	Fator de Sensibilidade
1	2,50
2	2,20
3	2,30
4	1,80
5	1,90
<b>Média</b>	2,14
<b>Desvio-padrão</b>	0,29
<b>Coefficiente de Variação</b>	13%
<b>Erro-padrão</b>	0,13

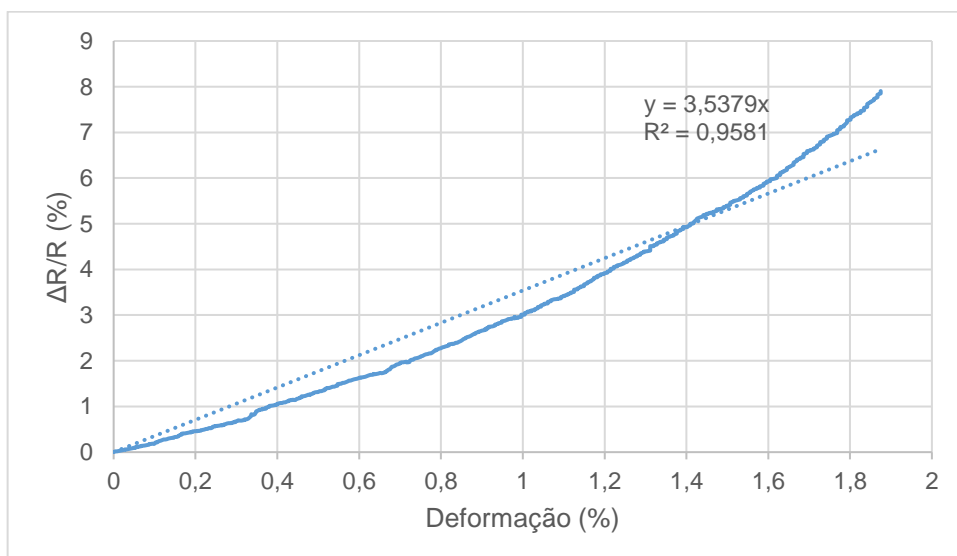
**Fonte: Autoria própria (2016)**

### 4.3 THREE ROLL MILL

Nesta seção, serão apresentados os gráficos obtidos pelo rompimento dos corpos de prova feitos pelo método *Three Roll Mill*.

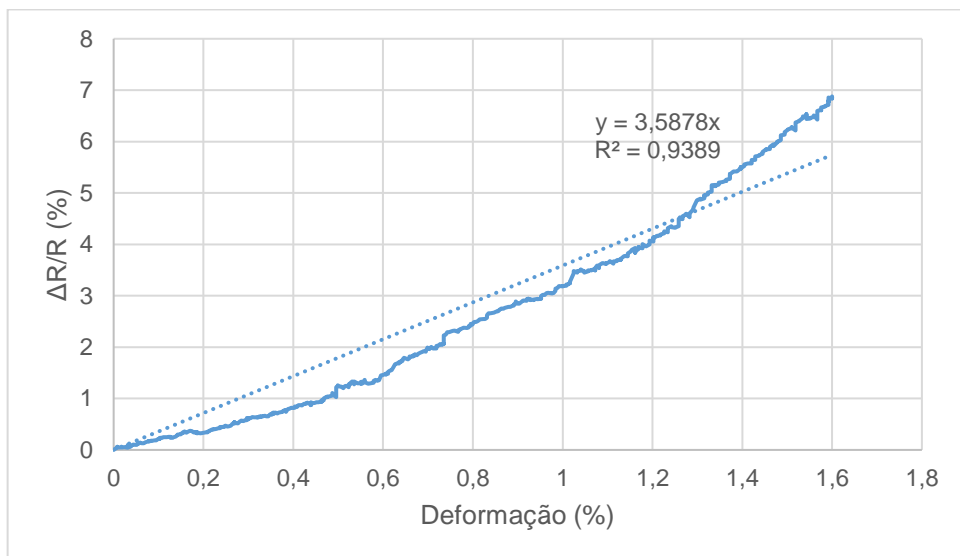
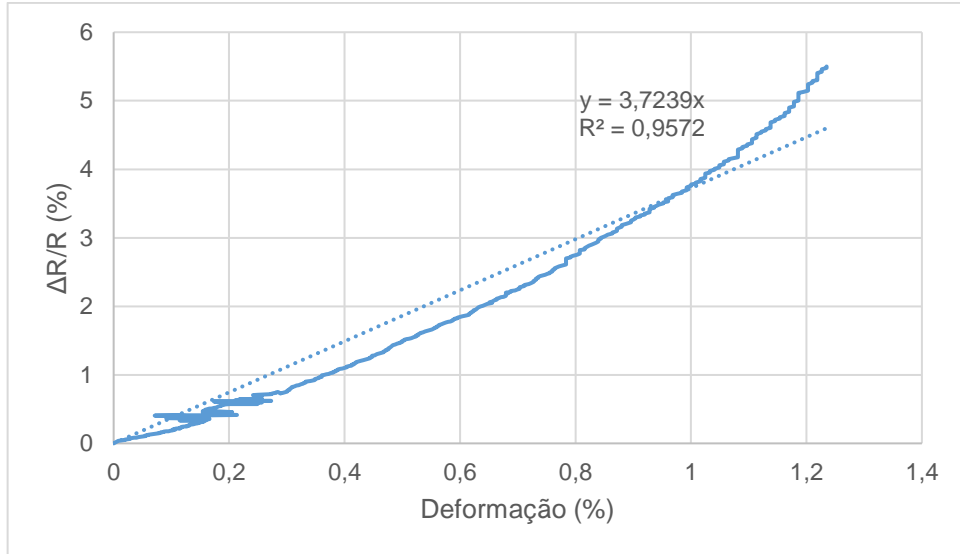
#### 4.3.1 *Three Roll Mill* 0,25%

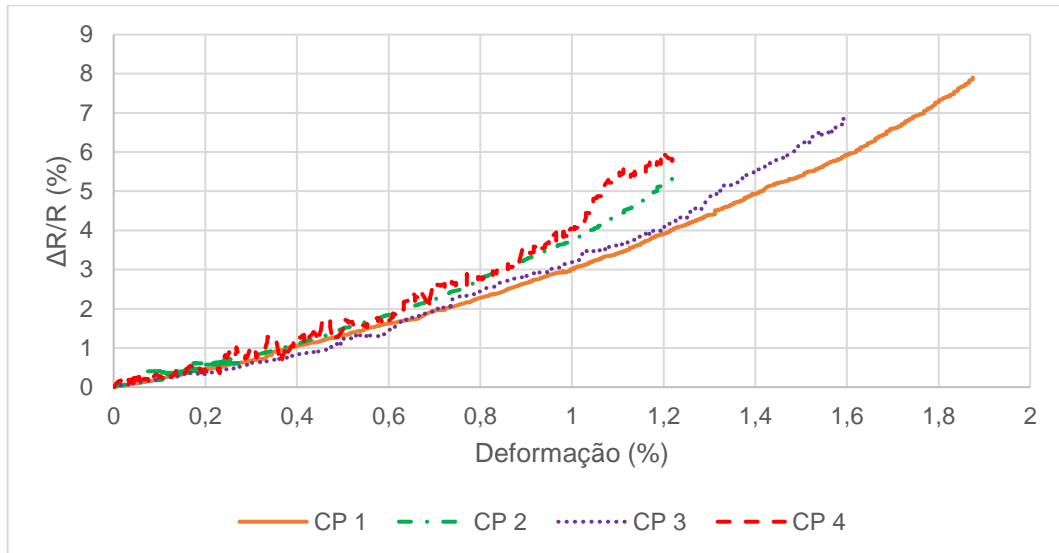
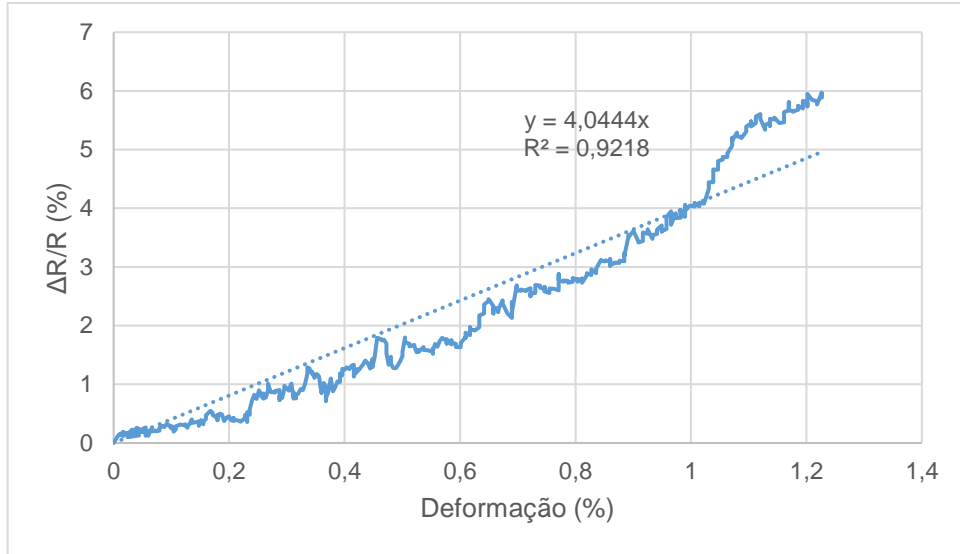
Nesta seção são apresentados os gráficos obtidos a partir do rompimento de quatro, dos cinco corpos de prova do método *Three Roll Mill* com a concentração de 0,25% do peso de nanotubo de carbono na matriz epóxi. Não foi possível gerar um gráfico com os dados obtidos pelo último corpo de prova devido a interferência do ruído. Os Gráficos 15 a 18 apresentam a relação da alteração relativa da resistência elétrica ( $\Delta R/R$ ) versus a deformação. Em todos os gráficos é observada a presença de falhas na continuidade das curvas, com destaque para os Gráficos 16 e 18, sendo estas causadas pela presença de ruído. Junto a estes gráficos é apresentada a linha de tendência com a função polinomial de 1° grau, pois o seu coeficiente angular é o fator de sensibilidade, principal objetivo da pesquisa. No Gráfico 19, são apresentados todos os gráficos juntos, para que o leitor possa compará-los e, observar que não há grande divergência entre os mesmos apesar da presença de ruído. Ao final, da seção é apresentada a Tabela 4, com o número de cada corpo de prova, e o seu respectivo fator de sensibilidade, bem como a média, o desvio-padrão, o coeficiente de variação e o erro-padrão, para a posterior comparação entre os métodos.



**Gráfico 15 – *Three Roll Mill* 0,25% (corpo de prova 1)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**







**Gráfico 19 – *Three Roll Mill* 0,25%**  
 Fonte: Autoria própria (2016)

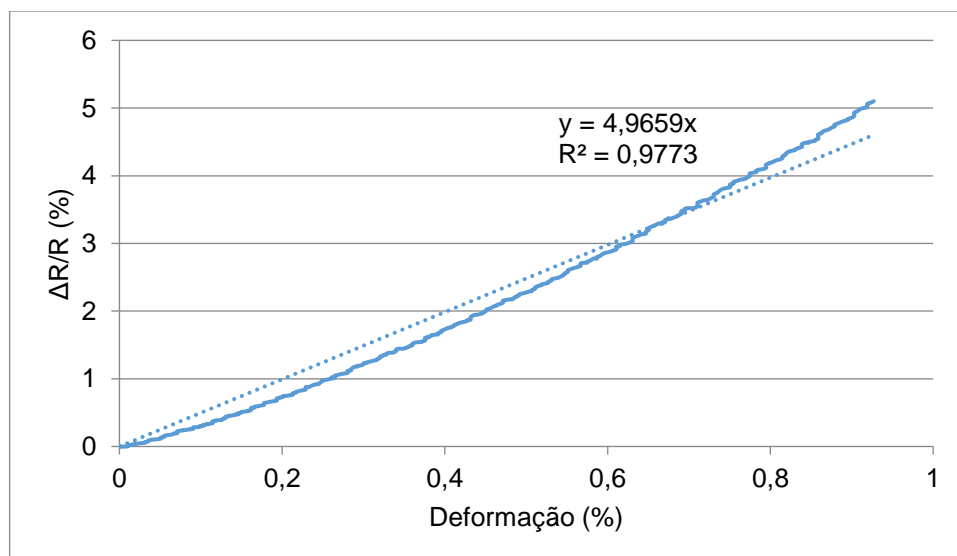
**Tabela 4 – *Three Roll Mill* 0,25%**

Corpo de prova	Fator de Sensibilidade
1	3,54
2	3,72
3	3,58
4	4,04
<b>Média</b>	3,72
<b>Desvio-padrão</b>	0,23
<b>Coefficiente de Variação</b>	6%
<b>Erro-padrão</b>	0,10

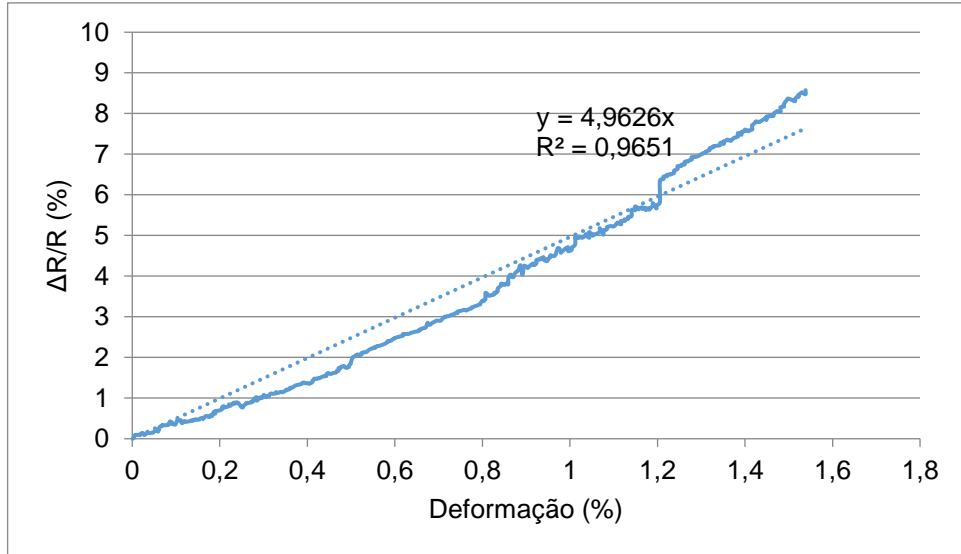
Fonte: Autoria própria (2016)

#### 4.3.2 *Three Roll Mill* 0,50%

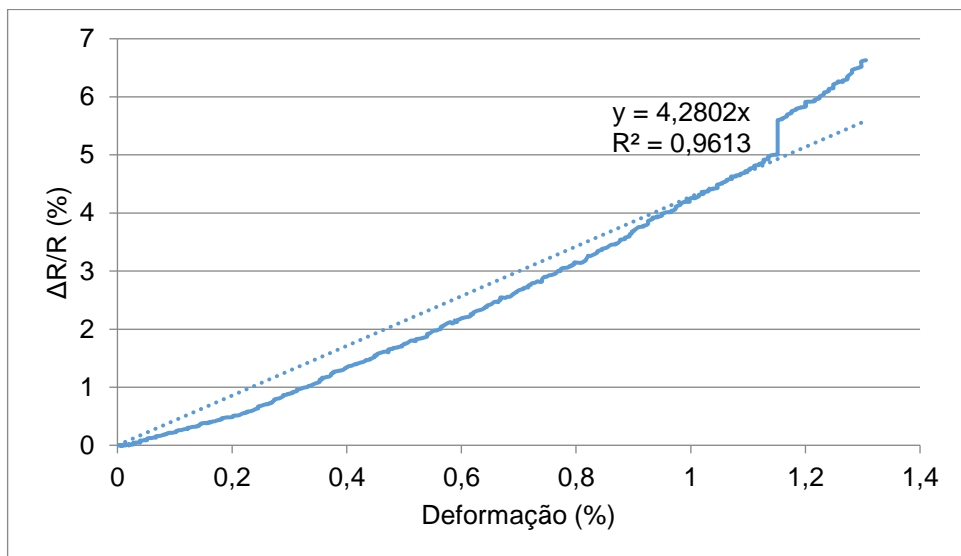
Nesta seção são apresentados os gráficos obtidos a partir do rompimento de quatro, dos cinco corpos de prova do método *Three Roll Mill* com a concentração de 0,50% do peso de nanotubo de carbono na matriz epóxi. Não foi possível gerar um quinto gráfico, pois durante o rompimento do corpo de prova 5, o *strain gage* queimou, impossibilitando o armazenamento dos dados. Os Gráficos 20 a 23 apresentam a relação da alteração relativa da resistência elétrica ( $\Delta R/R$ ) versus a deformação. Nos Gráficos 21 e 22, é observado uma falha na continuidade das curvas geradas. No Gráfico 21, a descontinuidade observada é atribuída ao ruído gerado pela máquina. No Gráfico 22, a descontinuidade pode ser atribuída a um fissuramento que o corpo de prova sofreu, porém não o suficiente para caracterizar o rompimento do mesmo. Junto a estes gráficos é apresentada a linha de tendência com a função polinomial de 1° grau, pois o seu coeficiente angular é o fator de sensibilidade, principal objetivo da pesquisa. No Gráfico 24, são apresentados todos os gráficos juntos, para que o leitor possa compará-los e, observar que apesar da não existência de tanto ruído como nos métodos anteriores, há divergência entre os mesmos. Ao final, da seção é apresentada a Tabela 5, com o número de cada corpo de prova, e o seu respectivo fator de sensibilidade, bem como a média, o desvio-padrão, o coeficiente de variação e o erro-padrão, para a posterior comparação entre os métodos.



**Gráfico 20 – *Three Roll Mill* 0,50% (corpo de prova 1)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Gráfico 21 – Three Roll Mill 0,50% (corpo de prova 2)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Gráfico 22 – Three Roll Mill 0,50% (corpo de prova 3)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

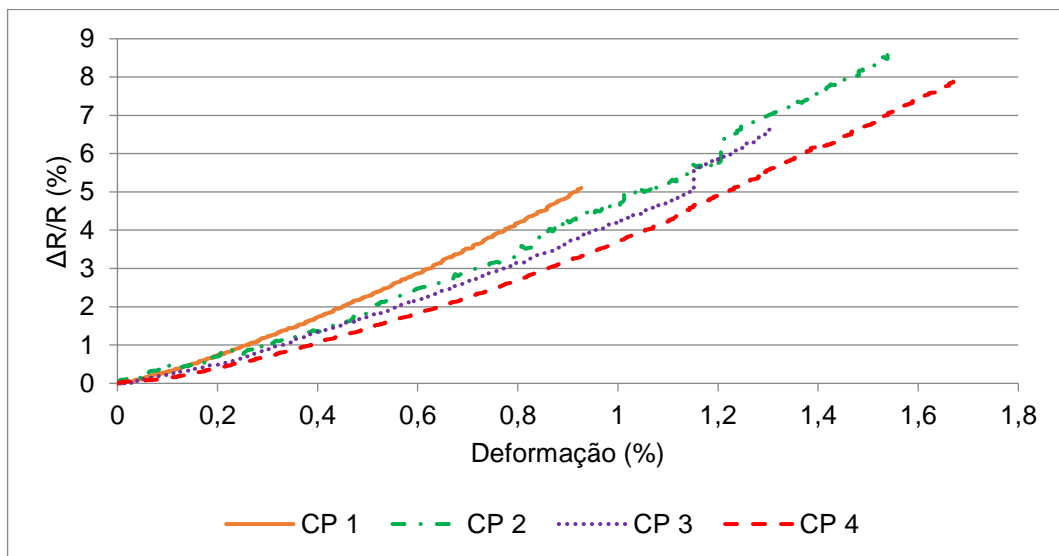
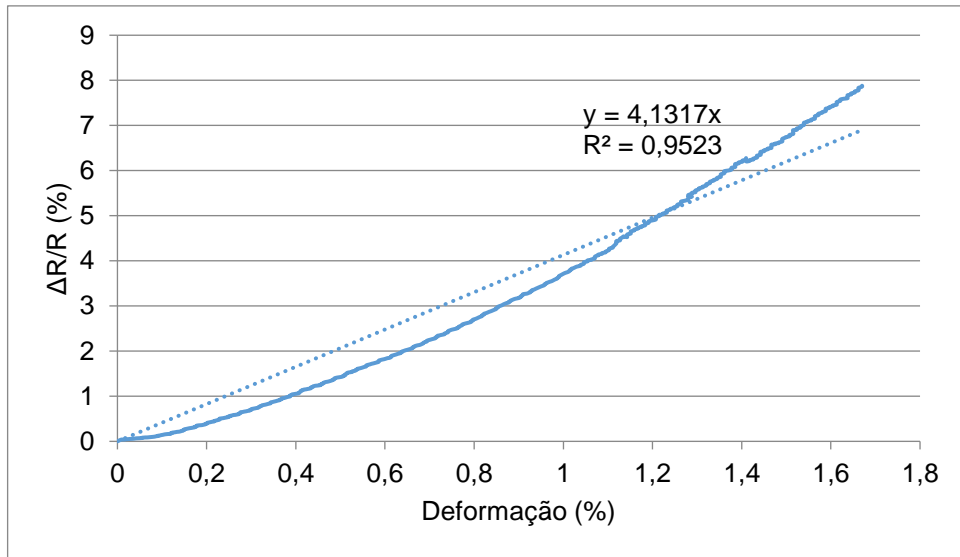


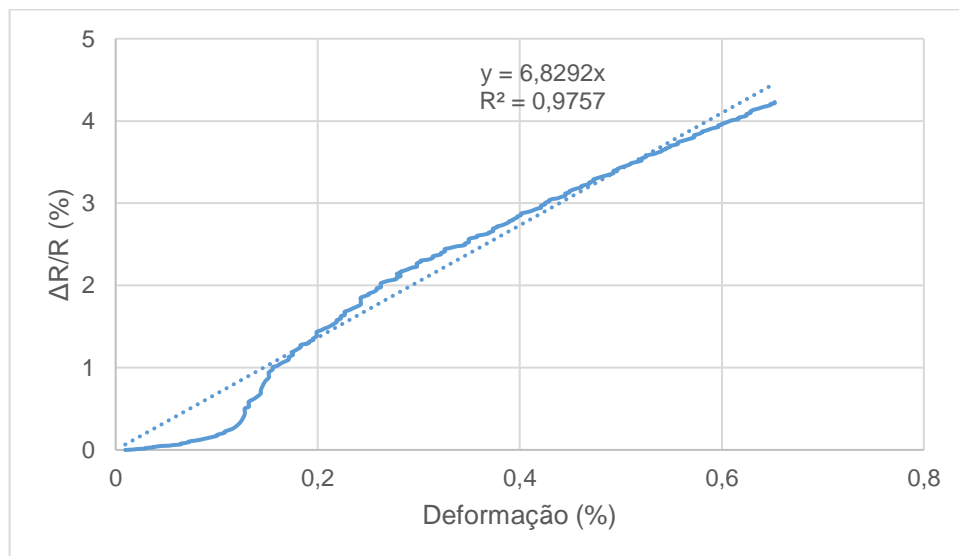
Tabela 5 – *Three Roll Mill* 0,50%

Corpo de prova	Fator de Sensibilidade
1	5,10
2	4,90
3	4,28
4	4,13
<b>Média</b>	4,60
<b>Desvio-padrão</b>	0,44
<b>Coefficiente de Variação</b>	10%
<b>Erro-padrão</b>	0,20

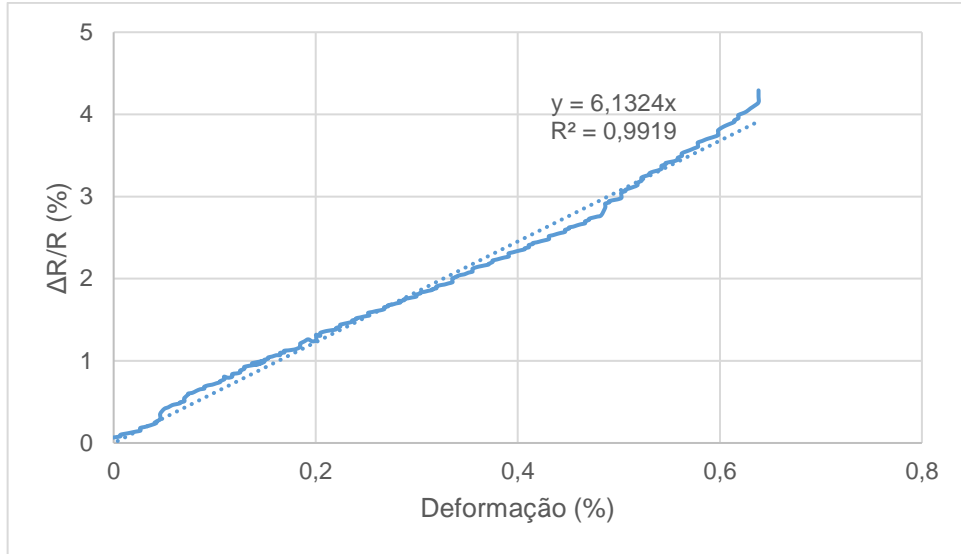
Fonte: Autoria própria (2016)

#### 4.4 ELECTROPHORETIC DEPOSITION (EPD)

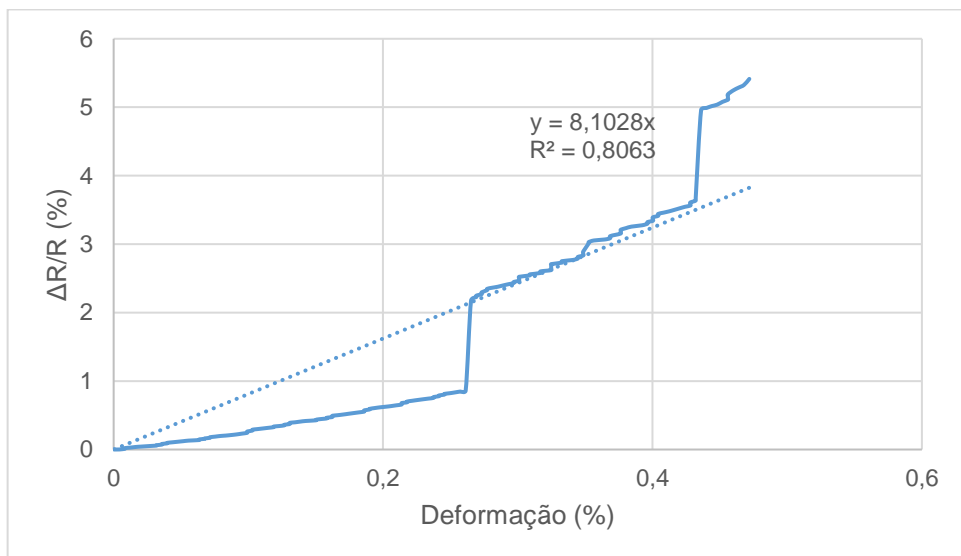
Nesta seção são apresentados os gráficos obtidos a partir do rompimento de quatro, dos cinco corpos de prova do método *Electrophoretic Deposition*. O gráfico gerado pelo quinto corpo de prova não é apresentado, pois a presença de ruídos no mesmo impossibilita a obtenção de qualquer informação inteligível. Os Gráficos 25 a 28 apresentam a relação da alteração relativa da resistência elétrica ( $\Delta R/R$ ) versus a deformação. Em todos os gráficos é observada a presença de falhas na continuidade das curvas, sendo estas causadas por ruídos e/ou início de fissuração do corpo de prova. Destacando o Gráfico 27, que apresenta dois “saltos”, que podem estar ligados a fissuramentos que o corpo de prova sofreu, porém, não o suficiente para caracterizar o rompimento do mesmo. Junto a estes gráficos é apresentada a linha de tendência com a função polinomial de 1º grau, visto que o seu coeficiente angular é o fator de sensibilidade, principal objetivo da pesquisa. No Gráfico 28, são apresentados todos os gráficos, para que o leitor possa compará-los e, observar as divergências entre as curvas. Ao final, da seção é apresentada a Tabela 6, com o número de cada corpo de prova, e o seu respectivo fator de sensibilidade, bem como a média, o desvio-padrão, o coeficiente de variação e o erro-padrão, para a posterior comparação entre os métodos.



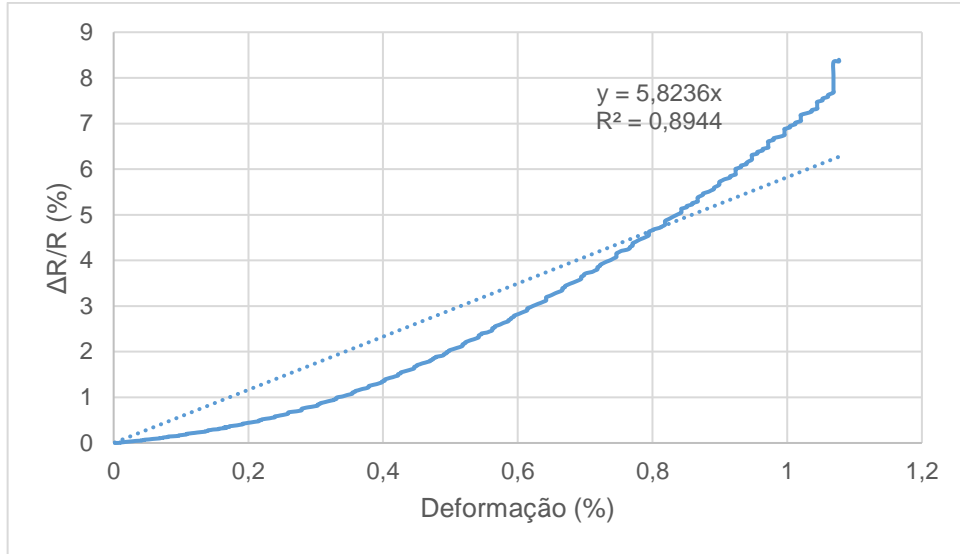
**Gráfico 25 – EPD (corpo de prova 1)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



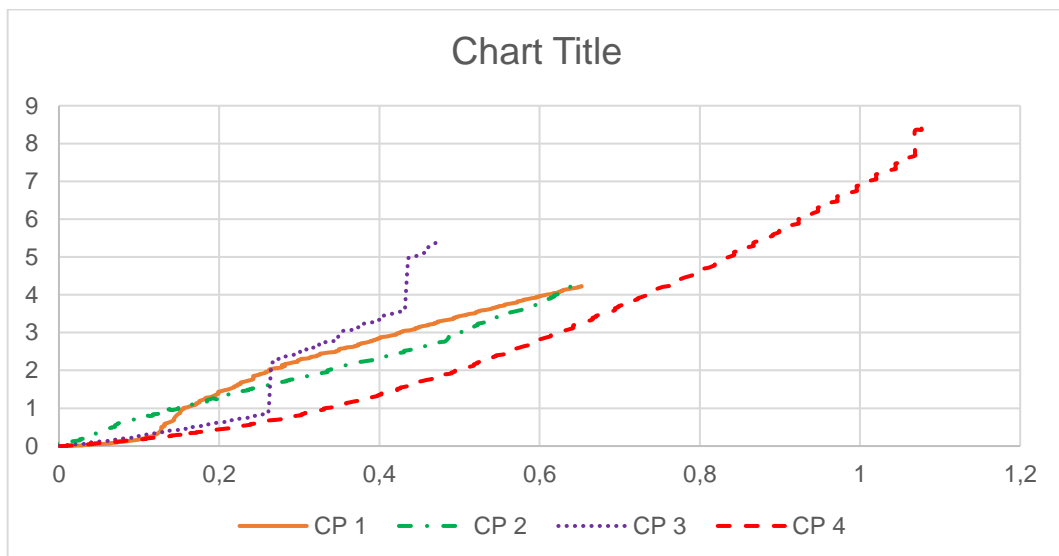
**Gráfico 26 – EPD (corpo de prova 2)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Gráfico 27 – EPD (corpo de prova 3)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Gráfico 28 – EPD (corpo de prova 4)**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**



**Gráfico 29 – EPD**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

**Tabela 6 – *Eletrophoretic Deposition* (EPD)**

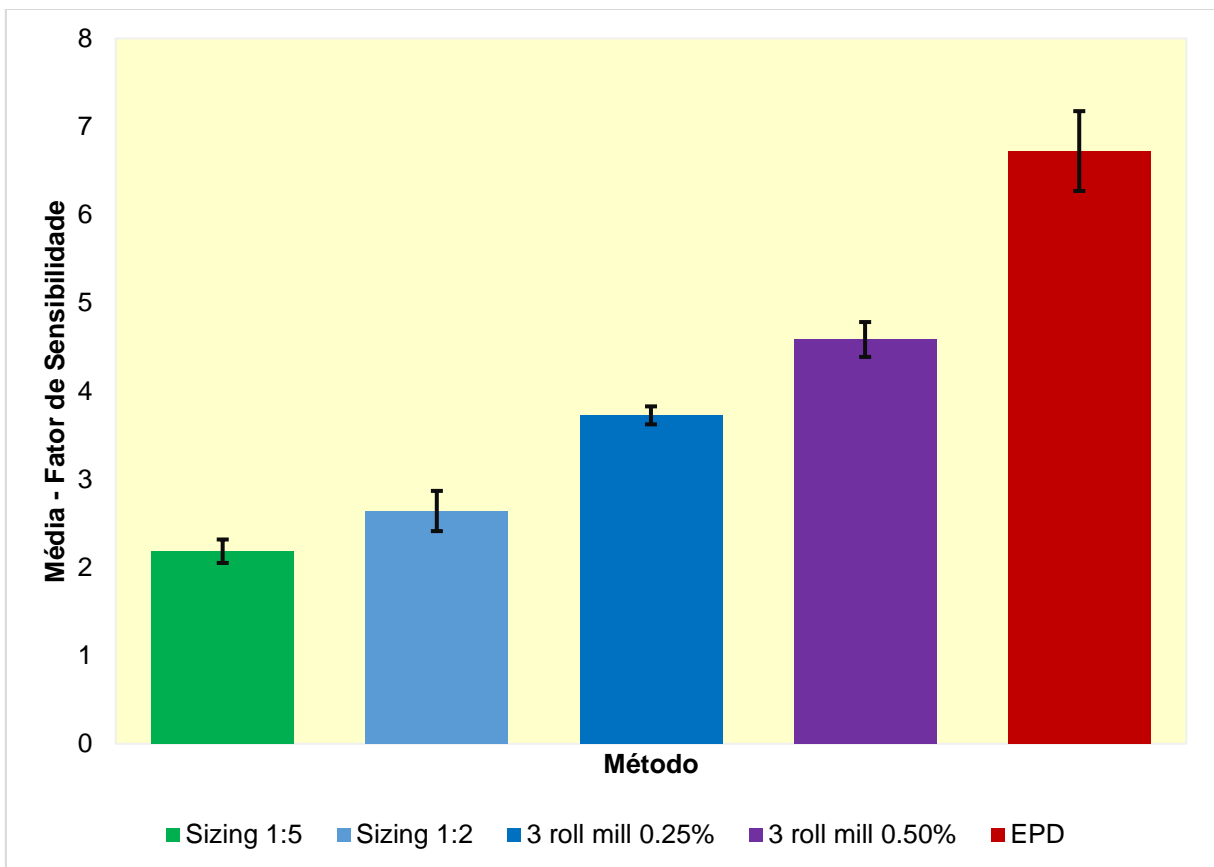
Corpo de prova	Fator de Sensibilidade
1	6,83
2	6,13
3	8,10
4	5,82
<b>Média</b>	6,72
<b>Desvio-padrão</b>	1,01
<b>Coefficiente de Variação</b>	15%
<b>Erro-padrão</b>	0,45

**Fonte: Autoria própria (2016)**



#### 4.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS

O Gráfico 30 apresenta de forma sucinta as informações apresentadas nas Tabelas 2 a 6. Ao comparar os métodos, pode-se afirmar que o método EPD é o mais sensível, apresentando Fator de sensibilidade médio de 6,72, porém é o método que apresenta maior erro-padrão, 0,45. Já o *Three Roll Mill* com a concentração de 0,25%, é o método que apresenta menor erro-padrão, mas seu Fator de Sensibilidade, 3,72, está em terceiro lugar.



**Gráfico 30 – Fator de sensibilidade com barra de erro**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo, entre os métodos *Three Roll Mill*, *Sizing* e *Electrophoretic Deposition*, investigar qual apresenta o maior fator de sensibilidade para o desenvolvimento futuro de sensores para o contínuo monitoramento estrutural. A escolha por estes três métodos se deu pois são os mais utilizados e estudados em pesquisas nessa área.

Para a investigação ser possível, os nanotubos de carbono foram processados com epóxi e resina de forma diferente para cada método, sendo o processamento e a deposição dos nanotubos de carbono na fibra as principais diferenças entre os três métodos.

Sobre este processo, pode-se afirmar que todas as etapas são facilmente executáveis, além de facilmente escalonáveis, parte dos equipamentos utilizados no processo já podem ser encontrados em escala industrial, como as estufas e as máquinas calandras. O tempo de execução é relativamente curto (toda a parte experimental foi realizada em dois meses), entretanto as máquinas e os materiais utilizados no processo de fabricação requerem um considerável investimento.

Após a fabricação dos corpos de prova, os mesmos foram rompidos. Em seguida, os dados obtidos foram analisados e, com os mesmos, foi calculado o fator de sensibilidade para cada método. Nota-se que o fator de sensibilidade é dado por uma equação linear, portanto, apesar dos gráficos gerados pelos dados obtidos através do rompimento dos corpos de prova serem de uma função polinomial de grau maior que 1, foi utilizado a aproximação linear para definir o fator de sensibilidade.

Pode-se observar que os fatores de sensibilidade para todos os métodos são maiores do que dos extensômetros tradicionais, que é uma descoberta para este campo. Sobre o objetivo principal deste trabalho, pode-se afirmar que os sensores desenvolvidos pelo método *Electrophoretic Deposition* (EPD) foram os que apresentaram maior fator de sensibilidade, 6,72, porém, ao analisar a barra de erro, este também é o método que apresenta o maior erro-padrão. Apesar do método *Three Roll Mill* com concentração de nanotubos de carbono a 0,25% ter um fator de sensibilidade menor do que o EPD, este é o método que apresenta os melhores resultados considerando-se a análise estatística.

Apesar das inúmeras pesquisas feitas sobre os três métodos, ainda não havia sido investigado o fator de sensibilidade dos mesmos. Nas pesquisas anteriores, foram estudadas formas de processar e depositar o nanotubo em fibras. Portanto, esta pesquisa inicia um novo campo de estudo para os sensores de nanotubo de carbono. A partir dela, sabe-se que os sensores fabricados pelo método EPD são os mais sensíveis e os fabricados pelo método *Three Roll Mill* 0,25% são os que apresentam resultados mais confiáveis.

Visando a necessidade de monitoramento estrutural contínuo, é de suma importância a continuidade dessa pesquisa, para que os sensores de nanotubo de carbono sejam uma realidade no monitoramento contínuo estrutural. Recomenda-se a continuidade da pesquisa com os sensores fabricados pelo método EPD e *Three Roll Mill* com concentração de nanotubos de carbono a 0,25%.

Para atingir o desenvolvimento de sensores com nanotubos de carbono, deve-se pesquisar como estes serão fabricados em grande escala, como serão implantados na superfície da estrutura e como serão feitos o armazenamento e a leitura dos dados gerados pelos mesmos, pois, os sensores de nanotubo de carbono devem ser capazes de proporcionar leituras em tempo real das mudanças de tensão, efeitos de temperatura, bem como, formação e propagação dos danos na estrutura. Por conseguinte, a partir das leituras feitas por estes sensores, serão possíveis manutenções preventivas a fim de evitar obras corretivas, proporcionando o aumento da vida útil das estruturas civis.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, Sérgio Lobato. **Inspeção e Monitoramento de Estruturas em Engenharia Civil – Utilização de UAV na Inspeção e Monitorização**. Dissertação de Mestrado. Universidade da Madeira. Setembro, 2012.
- AN, Qi; RIDER, Andrew N.; THOSTENSON, Erik T. Electrophoretic deposition of carbon nanotubes onto carbon-fiber fabric for production of carbon/epoxy composites with improved mechanical properties. **Carbon**, v. 50, n. 11, p. 4130-4143, mai. 2012.
- AN, Qi; RIDER, Andrew N.; THOSTENSON, Erik T. Hierarchical composite structures prepared by electrophoretic deposition of carbon nanotubes onto glass fibers. **ACS applied materials & interfaces**, v. 5, n. 6, p. 2022-2032, fev. 2013.
- BAYER, Raymond G. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing, revised and expanded**. 2 ed. New York: CRC Press, 2004.
- BECK, J. C. P.; DA SILVA, L. Extensômetros de resistência elétrica - Parte 2 - Tipos comerciais, codificação e desempenho. **Mecatrônica Fácil**; Ano: 6; n. 32; Jan / Fev – 2007. [online]. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/892-extensmetros-de-resistncia-eltrica-parte-2-tipos-comerciais-codificao-e-desempenho>>. Acesso em: 04 jun. 2016.
- BITTENCOURT, Tulio Nogueira. Estudo das técnicas de monitoramento de estruturas de Engenharia Civil e suas aplicações. **Escola Politécnica (EP)**. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.bv.fapesp.br/pt/bolsas/134243/estudo-das-tecnicas-de-monitoramento-de-estruturas-de-engenharia-civil-e-suas-aplicacoes/>>. Acesso em: 04 jun. 2016.
- BOYSEN, Earl; BOOKER, Richard D. **Nanotechnology for dummies**. John Wiley & Sons, *Wiley Publishing*. Ago. 2011.
- CALÇADA, Paulo de Azevedo Branco. Estudo dos Processos Produtivos na Construção Civil Objetivando Ganhos de Produtividade e Qualidade. Monografia (Graduação) – POLI/UFRL/Curso de Graduação em Engenharia Civil. Janeiro. RIO DE JANEIRO; ago. 2014. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10011841.pdf>>. Acesso em 04 jun. 2016.

CARDOSO, Marcelo Lima. **Utilização de Ensaio de Emissão Acústica na Indústria**. Belém: IESAM, 2013.

CORREA, Sônia Maria Barros Barbosa. **Probabilidade e estatística**. 2 ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtuais, 2003.

CORTIZO, Eduardo Cabaleiro. **Avaliação da Técnica de Termografia Infravermelha para Identificação de Estruturas Ocultas e Diagnóstico de Anomalias em Edificações: Ênfase em Edificações do Patrimônio Histórico: Ênfase em Edificações do Patrimônio Histórico**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal De Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, 2007.

DA SILVA, Elcia Ferreira; DE MIRANDA, Carlos D. M.; MONICO, João F. G. **O Uso de Receptores GPS no Monitoramento Planimétrico na UHE Luiz Eduardo Magalhães**. Comitê Brasileiro de Barragens. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu, mai. 2015.

DOS SANTOS, Leandro José et al. Fullereno [C<sub>60</sub>]: química e aplicações. **Química Nova**, v. 33, n. 3, p. 680-693, São Paulo, 2010.

FACHIN, Odília. Fundamentos da metodologia. 3 ed. São Paulo: Saraiva, 2011.

FERRARESI, Valtair Antonio. **Estudo do Fenômeno “Trinca de Reaquecimento” com o auxílio de Emissão Acústica**. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1996.

FIALHO, J. F. **Extensômetros elétricos de resistência: descrição e técnica de medida**. Lisboa, 1982

FURLAN, Humber; FRAGA, Mariana Amorim. DESENVOLVIMENTO DE STRAIN GAUGES SEMICONDUTORES PARA APLICAÇÕES EM ALTAS TEMPERATURAS. 2010

GAO, L. et al. Highly conductive polymer composites based on controlled agglomeration of carbon nanotubes. **Carbon**, v. 48, n. 9, p. 2649-2651, mar. 2010.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GRABOWSKI, Krzysztof et al. Strain Sensors Based on Carbon Nanotube - Polymer Coatings. Le Cam, Vincent and Mevel, Laurent and Schoefs, Franck. **EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring**, Nantes, France; Jul. 2014.

GRANEMANN, D. C. et al. **Estabelecimento de uma Rede Geodésica para o Monitoramento de Estruturas: Estudo de Caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias**. Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Setor de Ciências da Terra – Departamento de Geomática. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 14, no 2, p. 200-220, abr-jun, 2008.

GRANTE (Grupo de Análise e Projeto Mecânico). UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC). **Apostila de Extensometria**. Florianópolis, 2004, 48 p.

HERBST, Marcelo Hawrylak; MACÊDO, Maria Iaponeide Fernandes; ROCCO, Ana Maria. Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar. **Química Nova**, v. 27, n. 6, p. 986-992, ago. 2004.

IOCHIDA, Lúcia Christina; CASTRO, Aldemar Araujo. Projeto de pesquisa (parte VIII–método estatístico/análise estatística). **Castro AA. Planejamento da Pesquisa**. p. 1-15. São Paulo: AAC, 2001. Disponível em: <[http://www.decisaoclinica.com/planejamento/pdf/lv4\\_11\\_anaest.pdf](http://www.decisaoclinica.com/planejamento/pdf/lv4_11_anaest.pdf)>. Acesso em: 22 out. 2016.

KANOUN, Olfa et al. Flexible carbon nanotube films for high performance strain sensors. **Sensors**, v. 14, n. 6, p. 10042-10071, jun. 2014.

KNECHT, Alfredo; MANETTI, Luca. Using GPS in structural health monitoring. In: **SPIE'S 8th annual international symposium on smart structures and materials**. International Society for Optics and Photonics, p. 122-129, mar. 2001.

KO, J. M.; NI, Y. Q. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. **Engineering structures**, Hong Kong; v. 27, n. 12, p. 1715-1725, jul. 2005.

KOPELIOVICH, Dmitri. Homogenization. **SubsTech**, 2013 Disponível em: <<http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=homogenization>>. Acesso em: 03 nov. 2016

LAROCCA, A. P. C. et al. Uso de receptores GPS de 100 Hz na detecção de deflexões verticais milimétricas de pontes de concreto de pequeno porte/The use of GPS at a rate of 100 HZ to detect millimetric vertical deflections of small sized

concrete bridges. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba; v. 21, n. 2, p. 290-307, abr-jun, 2015.

LI, Hong-Nan; LI, Dong-Sheng; SONG, Gang-Bing. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. **Engineering structures**, Houston; v. 26, n. 11, p. 1647-1657, mai. 2004.

LIMA, Eduardo Campos. Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto. Pesquisadora do IPT comenta as inovações na inspeção de estruturas de concreto e os benefícios do uso de sensores para monitoramento ininterrupto. **Infraestrutura Urbana**. 28 ed. São Paulo, Pini, jul. 2013. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/28/artigo291127-1.aspx>>. Acesso em: 04 abr. 2016.

LORENZI, A. et al. **Utilização de ultrassom para o monitoramento de estruturas de concreto**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, Porto Alegre, 2003.

LUNET, Nuno; SEVERO, Milton; BARROS, Henrique. Desvio padrão ou erro padrão. Notas metodológicas. **Arquivos de Medicina**, v. 20, n. 1/2, p. 55-59, 2006.

MUFTI, Aftab A. Structural health monitoring of innovative. Canadian civil engineering structures. **Structural Health Monitoring**, v. 1, n. 1, p. 89-103, 2002.

NERY, Gilberto. Boletín Técnico. Monitoreo en la Construcción Civil. **ALCONPAT Internacional**. México, 2013.

O'CONNELL, Michael J. **Carbon Nanotubes: properties and applications**. Florida: Taylor and Francis Group, 2006. 360 p., ISBN 9780849327483.

OLIVEIRA SANTOS, Luís. **Monitoramento e ensaio de pontes**. VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, mai. 2014.

PACECON, Technosys. Magnetic stirrer. Disponível em: <<http://www.pacecon.net/magnetic-stirrer/>>. Acesso em: 03 nov. 2016.

PANDEY, G. et al. Localized functionally modified glass fibers with carbon nanotube networks for crack sensing in composites using time domain reflectometry. **Carbon**, v. 50, n. 10, p. 3816-3825, abr. 2012.

PORTNOI, Marcos. **Extensometria – História, uso e aparelhos**. Disponível em: <<https://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

RIGONATTO, Marcelo. Coeficiente de Variação. **Mundo Educação**. 2016. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/matematica/coeficiente-variacao.htm>>. Acesso em: 11 nov. 2016.

ROCHA-FILHO, Romeu C. Os fulerenos e sua espantosa geometria molecular. **Química Nova na Escola**, v. 4, p. 7-11, nov. 1996.

ROUSE, Margaret. Noise Data. **TechTarget**. 2010. Disponível em: <<http://searchbusinessanalytics.techtarget.com/definition/noisy-data>>. Acesso em: 06 nov. 2016.

SÁEZ, José A. Noisy Data in Data Mining. **Soft Computing and Intelligent Information Systems**. 2015. Disponível em <<http://sci2s.ugr.es/noisydata>>. Acesso em 11 nov. 2016.

SANTOS, Altair. Métodos de ensaios não destrutivos para estruturas de concreto. **Massa Cinzenta**. 2010. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/metodos-de-ensaios-nao-destrutivos-para-estruturas-de-concreto/>>. Acesso em: 02 nov. 2016.

SHAH, Tushar K.; GARDNER, Slade H.; ALBERDING, Mark R. **CNT-infused fiber and method therefor**. U.S. Patent n. 8,158,217, 17 abr. 2012.

SILVEIRA, João F. A. **Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 320 p.

TABACNIKS, Manfredo Harri. **Conceitos básicos da teoria de erros**. Instituto de Física da Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2003.

THOSTENSON, Erik T.; CHOU, Tsu-Wei. Carbon nanotube-based health monitoring of mechanically fastened composite joints. **Composites Science and Technology**, v. 68, n. 12, p. 2557-2561, jun. 2008a.

THOSTENSON, Erik T.; CHOU, Tsu-Wei. Real-time *in situ* sensing of damage evolution in advanced fiber composites using carbon nanotube networks. **Nanotechnology**, v. 19, n. 21, p. 1-6, apr. 2008b.



THOSTENSON, Erik T.; CHOU, Tsu-Wei. Processing-structure-multi-functional property relationship in carbon nanotube/epoxy composites. **Carbon**, v. 44, n. 14, p. 3022-3029, jul. 2006.

THOSTENSON, Erik T.; REN, Zhifeng; CHOU, Tsu-Wei. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. **Composites science and technology**, v. 61, n. 13, p. 1899-1912, jun. 2001.

VEIGA, Caroline. O problema da falta de manutenção. **Massa Cinzenta**. 2007. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/o-problema-da-falta-de-manutencao/>>. Acesso em: 05 nov. 2016.

VILLANUEVA, Marina Miranda. **A importância da manutenção preventiva para o bom desempenho da edificação**. Rio de Janeiro: UFRJ. Escola Politécnica, 2015.

WEBER, Albano Luiz. **Extensometria** (Instrumentação) – Metrologia e Instrumentação. UCS – Departamento de Engenharia Mecânica. Caxias do Sul, 2008.

ZARBIN, A. J. G. Química de (nano)materiais. **Química Nova**, Curitiba, PR, v. 30, n. 6, p. 1469-1479, 2007.