Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Departamento de Engenharia Mecânica
unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"Júlio de Mesquita Filho"

MONITORAMENTO DE DANOS ESTRUTURAIS UTILIZANDO SENSORES DE NANOCOMPÓSITOS

Mestrando:	**Breno Ebinuma Takiuti**
Orientador:	**Prof. Dr. Vicente Lopes Júnior**
Co-orientador:	**Prof. Dr. Marcelo Ornaghi Orlandi**

Ilha Solteira
2015.

BRENO EBINUMA TAKIUTI

MONITORAMENTO DE DANOS ESTRUTURAIS UTILIZANDO SENSORES DE NANOCOMPÓSITOS

Dissertação apresentado à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Especialidade: Mecânica dos Sólidos.

Orientador: **Prof. Dr. VICENTE LOPES JÚNIOR**
Co-orientador: **Prof. Dr. MARCELO ORNAGHI ORLANDI**

Ilha Solteira
2015

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Takiuti, Breno Ebinuma.
T136m Monitoramento de danos estruturais utilizando sensores de nanocompósitos / Breno Ebinuma Takiuti. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
110 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2015

Orientador: Vicente Lopes Júnior
Co-orientador: Marcelo Ornaghi Orlandi
Inclui bibliografia

1. Nanocompósitos. 2. Materiais inteligentes. 3. Nanoestruturas. 4. Detecção de danos. 5. Monitoramento da integridade estrutural.

unesp **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Monitoramento de danos estruturais utilizando sensores de nanocompósitos

AUTOR: BRENO EBINUMA TAKIUTI

ORIENTADOR: Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCELO ORNAGHI ORLANDI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica , Área: MECANICA DOS SÓLIDOS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MICHAEL JOHN BRENNAN
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. CARLOS DE MARQUI JUNIOR
Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística / Universidade de São Paulo

Data da realização: 03 de março de 2015.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Célia e Robert.

Aos meus irmãos Arthur, Júlia, Danilo e Tainá, pelo companheirismo e compreensão.

A todos os amigos da graduação, principalmente ao Douglas e ao Marcos, pela parceria e convívio durante todos esses anos.

À Patrícia, minha inspiração e força, que me mantiveram firme na busca pelas minhas metas.

Ao Prof. Vicente Lopes Júnior por confiar este projeto a mim e pela paciência na orientação.

Ao LMA-IQ (Laboratório de Microscopia Avançada – Instituto de Química de Araraquara - UNESP) pela disponibilidade de utilização do microscópio eletrônico de varredura.

Ao GC3M, ao Carlos Eduardo e ao Prof. Ruis Camargo Tokimatsu, pela disponibilidade de utilização da máquina universal de ensaios, e pelo auxílio nos ensaios.

À Ellen Poliani, pelo suporte na criação dos nanocompósitos.

Aos colegas de pós graduação e ao GMSINT, pelo apoio nos laboratórios e pelos momentos de descontração.

Aos técnicos dos laboratórios de engenharia mecânica em Ilha Solteira, e de física e química de Araraquara.

Aos colegas da pós graduação do LIEC de Araraquara, pela paciência e suporte no laboratório de nanomateriais.

Aos prof. Walter Katsumi Sakamoto, prof. José Antônio Malmonge e Alex Otávio Sanches, pelo suporte com as medições elétricas.

Ao CNPq, FAPEMIG e INCT-EIE pelo apoio financeiro parcial.

À FAPESP, pelo apoio financeiro através do processo 2012/25153-1.

A todos que não puderam ser citados, mas que sabem que foram igualmente importantes nessa jornada...

“Os dias prósperos não vêm por acaso; nascem de muita fadiga e persistência.”

Henry Ford

RESUMO

Com o objetivo de assegurar a integridade estrutural de estruturas aeronáuticas, diversas técnicas de monitoramento da integridade estrutural têm sido estudadas. Uma das técnicas mais recentes é a utilização de sensores contínuos, constituídos de filmes delgados de nanocompósitos. A vantagem em se utilizar estes materiais é a possibilidade de se aplicar tais sensores em superfícies complexas, cobrindo uma grande área e utilizando poucos terminais de aquisição. Este tipo de material permite o controle das suas características mecânicas e elétricas, possibilitando a criação de um sensor customizado para cada situação. O nanocompósito mais encontrado na literatura para fins de detecção de falhas é o compósito de nanotubos de carbono (CNT), sendo que a matriz utilizada varia de acordo com cada caso. Este trabalho propõe a utilização de materiais alternativos como os nanofios de ITO (*Indium tin oxide* ou óxido de índio dopado com estanho) inseridos em matriz de PMMA (polimetil-metacrilato) para o revestimento da superfície a ser monitorada. Afim de verificar a efetividade destes sensores, diversos testes foram propostos. Estes testes consistem em monitorar o comportamento dos nancompósitos quando afetados por algum tipo de dano, os quais podem ser uma adição de massa, excesso de cargas tensoras ou uma trinca. Para isto, o intuito é medir as resistências elétricas entre dois pontos e verificar a influência do dano no valor medido. Em geral as resistências obtidas variaram entre 1kΩ e 10kΩ, sendo que com o aparecimento do dano, as medições apresentaram variações de mais de 30% tanto no caminho com o dano como nos caminhos em sua proximidade. Testes com o sensor em uma câmara ambiental, com controle de temperatura e umidade, mostraram que o sensor é sensível a altas temperatura e a altas umidades. Quanto à sensibilidade às tensões de tração aplicadas na placa, o sensor só mostrou alterações em sua resistência quando a placa iniciou o processo de deformação plástica. Os resultados obtidos mostraram-se promissores e indicam que o método é eficaz na detecção de danos.

Palavras-chave: Nanocompósitos. Materiais inteligentes. Nanoestruturas. Detecção de danos. Monitoramento da integridade estrutural.

ABSTRACT

With the objective of structural health monitoring (SHM) in aerospace structures, several monitoring techniques have been studied. One of the most recent techniques is based on the use of continuous sensors, made of thin films of nanocomposites. The advantage of using such materials is the possibility to apply them on complex surfaces, covering larger areas and using few acquisition terminals. Moreover, by using the nanocomposites, it is possible to control its mechanical and electrical properties, making it possible to create a customized sensor for each case. The nanocomposite found most commonly in the literature for damage detection are the carbon nanotubes (CNT) composites, while the matrix depends on each case. This work proposes the use of alternative materials such as the ITO (Indium tin oxide) nanowires inserted at PMMA (Poly(methyl methacrylate)) to be used as coatings for the monitored structure. In order to verify the effectiveness of this sensor, several tests were proposed. These tests consists on monitoring the nanocomposite's behavior when affected by some kind of damage, in which can be simulated by a mass addition, excess of load or a crack. The principle for the damage detection is to measure the electrical resistance between two points at the film sensor and verify the variations caused by the damage to these measurements. In general, the obtained resistances varied from 1kΩ to 10kΩ, while with the damage appearance the measurements varied more than 30% at the path with the damage and at the paths nearby. Tests at the environmental chamber, with temperature and humidity control, showed that the sensor is sensitive to high temperatures and humidity levels. Regarding the sensibility to stress applied to the plate, the sensor showed changes at the resistances only when the plate started to deform plastically. The obtained results are promising and indicate that this method is effective for damage detection.

Keywords: Nanocomposites. Smart materials. Nanostructures. Damage detection. Structural health monitoring.

.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rede de nervos de nanocompósitos. 24
Figura 2 – Representação da célula unitária do óxido de índio dopado com estanho. 31
Figura 3 – Exemplos de filmes com 1%, 2%, 5% e 10% em massa de ITO por PMMA obtidos por Arlindo, 2012. 34
Figura 4 – a) Óxido de índio. b) Óxido de estanho. 37
Figura 5 – Forno tubular utilizado. 38
Figura 6 – Resultado de uma das sínteses de ITO. 38
Figura 7 – Resultado das análises no FEG/MEV de algumas nanofitas. 39
Figura 8 – Placa de alumínio utilizada. 40
Figura 9 – Desruptor de Célula utilizado para dispersar o ITO. 41
Figura 10 – Placa de alumínio revestido com o nanocompósito. 42
Figura 11 – a) Placa com a máscara. b) Máscara recoberta com ouro. c) Placa com os terminais e fios para a "soldagem". 43
Figura 12 – Placa com os fios colados. 43
Figura 13 – Interface gráfica do VI desenvolvido. 44
Figura 14 – Diagrama de blocos do VI. 45
Figura 15 – Máquina universal de ensaios 46
Figura 16 – Montagem do experimento com o ensaio de tração. 47
Figura 17 – Detalhe da fixação da placa. 48
Figura 18 – Comportamento típico do gráfico tensão/deformação do alumínio. 49
Figura 19 – Câmara ambiental 50
Figura 20 – Carta Psicrométrica para a pressão atmosférica de Ilha Solteira. 51
Figura 21 – Algumas das placas obtidas. 52
Figura 22 – Placa D1, Ensaio de tração nº 1. 53
Figura 23 – Placa D1, Ensaio n° 2. 53
Figura 24 – Placa D1, Ensaio nº 3. 54
Figura 25 – Placa D1, Ensaio nº 4. 54
Figura 26 – Placa D1, Ensaio nº 5. 55
Figura 27 – Placa D1, Ensaio nº 6. 55
Figura 28 – Placa D1, Ensaio nº 7. 56
Figura 29 – Placa D1, Ensaio nº 8. 56

Figura 30 – Placa D1, Ensaio nº 9. 57
Figura 31 – Placa D1, Ensaio nº 10. 57
Figura 32 – Placa D2, Ensaio de tração nº 1. 59
Figura 33 – Placa D2, Ensaio n° 2. 59
Figura 34 – Placa D2, Ensaio nº 3. 60
Figura 35 – Placa D2, Ensaio nº 4. 60
Figura 36 – Placa D2, Ensaio nº 5. 61
Figura 37 – Placa D2, Ensaio nº 6. 61
Figura 38 – Placa D2 depois de ser retirada da máquina de ensaios. 63
Figura 39 – Gráfico do comportamento da resistência r12 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 64
Figura 40 – Gráfico do comportamento da resistência r14 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 65
Figura 41 – Gráfico do comportamento da resistência r15 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 65
Figura 42 – Gráfico do comportamento da resistência r16 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 66
Figura 43 – Gráfico do comportamento da resistência r23 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 66
Figura 44 – Gráfico do comportamento da resistência r25 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 67
Figura 45 – Gráfico do comportamento da resistência r26 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 67
Figura 46 – Gráfico do comportamento da resistência r36 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 68
Figura 47 – Gráfico do comportamento da resistência r42 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 68
Figura 48 – Gráfico do comportamento da resistência r43 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 69
Figura 49 – Gráfico do comportamento da resistência r45 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 69
Figura 50 – Gráfico do comportamento da resistência r53 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas 70

Figura 51 – Gráfico do comportamento da resistência r56 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas. 70
Figura 52 – Gráfico dos valores RMS pela temperatura. 72
Figura 53 – Gráfico do comportamento da resistência r12 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 73
Figura 54 – Gráfico do comportamento da resistência r14 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 73
Figura 55 – Gráfico do comportamento da resistência r15 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 74
Figura 56 – Gráfico do comportamento da resistência r16 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 74
Figura 57 – Gráfico do comportamento da resistência r23 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 75
Figura 58 – Gráfico do comportamento da resistência r25 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 75
Figura 59 – Gráfico do comportamento da resistência r26 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 76
Figura 60 – Gráfico do comportamento da resistência r36 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 76
Figura 61 – Gráfico do comportamento da resistência r42 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 77
Figura 62 – Gráfico do comportamento da resistência r43 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 77
Figura 63 – Gráfico do comportamento da resistência r45 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 78
Figura 64 – Gráfico do comportamento da resistência r53 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 78
Figura 65 – Gráfico do comportamento da resistência r56 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas. 79
Figura 66 – Gráfico dos valores RMS pela umidade da placa D3. 80
Figura 67 – Medições de resistência enquanto variava-se a umidade. 82
Figura 68 – Placa D3 antes do dano e depois do dano. 83
Figura 69 – Gráfico dos valores RMS pela temperatura da placa D3 após o dano. 85

Figura 70 – Comparação das resistências dos caminhos próximos ao dano na placa D3 a 30ºC e umidade de 70%.....85
Figura 71 – Diversas possibilidades de caminho que a corrente pode percorrer. 86
Figura 72 – Análise dos locais livres de danos da placa D3.....87
Figura 73 – Gráfico dos valores RMS pela umidade da placa D3 com o dano.....90
Figura 74 – Comparação das resistências dos caminhos próximos ao dano na placa D3 a 50°C e umidade de 70%.....90
Figura 75 – Gráfico dos valores RMS pela temperatura, mantendo a umidade constante em 70% da placa D4 sem o dano.....92
Figura 76 – Placa D4 antes do dano e depois do dano D4. 94
Figura 77 – Gráfico dos valores RMS pela temperatura da placa D4 com dano. 95
Figura 78 – Comparação das resistências dos caminhos próximos ao dano da placa D4 a 30°C e umidade de 70%.....97
Figura 79 – Gráfico dos valores RMS pela umidade da placa D5 sem dano. 99
Figura 80 – Placa antes do dano e depois do dano (D5).....100
Figura 81 – Gráfico dos valores RMS para variação na umidade da placa D5 com dano. 101
Figura 82 – Análise dos locais livres de danos (D5). 103
Figura 83 – Comparação das resistências dos caminhos próximos ao dano da placa D5 a 30°C e umidade de 70%.....104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Causas de falhas em estruturas metálicas em aeronaves. 19
Tabela 2 – Valores médios e desvios padrões da primeira placa. 58
Tabela 3 – Valores médios e desvios padrões da segunda placa. 62
Tabela 4 – Valores RMS de cada resistência para variação da temperatura mantendo a umidade em 70% para a placa D3. 71
Tabela 5 – Comparações de resistências para variação da temperatura mantendo a umidade em 70% para a placa D3. 71
Tabela 6 – Valores RMS de cada resistência para variação da umidade mantendo a temperatura em 50°C para a placa D3 sem o dano. 79
Tabela 7 – Comparações de resistências para variação da umidade mantendo a temperatura em 50°C para a placa D3 sem o dano. 80
Tabela 8 – Valores RMS de cada resistência para variação da temperatura mantendo a umidade em 70% para a placa D3. 83
Tabela 9 – Comparações de resistências para variação da temperatura mantendo a umidade em 70% para a placa D3. 84
Tabela 10 – Comparação entre a placa sem dano e com dano variando a temperatura (D3). .. 84
Tabela 11 – Valores RMS de cada resistência para variação da umidade mantendo a temperatura em 50°C para a placa D3.com o dano. 88
Tabela 12 – Comparações de resistências para variação da umidade mantendo a temperatura em 50°C para a placa D3 com o dano. 89
Tabela 13 – Comparação entre as placas com dano e sem dano variando a umidade da placa D3. 89
Tabela 14 – Valores RMS das resistências na placa D4 sem dano, variando a temperatura. .. 91
Tabela 15 – Comparações de resistências para variação da temperatura mantendo a umidade constante para a placa D4 sem o dano. 93
Tabela 16 – Valores RMS das resistências na placa com dano variando a temperatura e com umidade constante em 70% da placa D4. 94
Tabela 17 – Comparações entre as resistências da placa D4 com dano variando a temperatura e mantendo a umidade constante. 95
Tabela 18 – Comparação entre a placa sem dano e com dano variando a temperatura e mantendo a umidade constante para a placaD4. 96

Tabela 19 – Valores RMS das resistências na placa com dano variando a umidade e mantendo a temperatura constante da placa D5. 98
Tabela 20 – Comparação das resistências da placa D5 sem dano variando a umidade e mantendo a temperatura constante. 98
Tabela 21 – Valores RMS das resistências na placa D5 com dano variando a umidade. 100
Tabela 22 – Comparações entre as resistências da placa D5 com dano variando a umidade e mantendo a umidade constante. 101
Tabela 23 – Comparação da placa D5 sem dano e com dano variando a umidade e mantendo a temperatura constante (D5). 102

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

1.1 Objetivos 18

1.2 Motivação Para A Execução Do Trabalho 18

2 MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL 20

2.1 Introdução 20

2.2 Fatores que Interferem na Detecção de Danos 21

2.3 Rede De Sensores 22

3 NANOCOMPÓSITOS 25

3.1 Introdução 25

3.2 Nanotubos De Carbono 28

3.3 Nanocompósitos de CNT em SHM 29

3.4 Óxido de Índio Dopado com Estanho 31

3.5 Nanocompósito de ITO 33

4 METODOLOGIA 36

4.1 Introdução 36

4.2 Síntese do ITO 37

4.3 Nanocompósito de ITO/PMMA 39

4.4 Caracterização do Filme/Sensor 42

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 52

5.1 Influência da Tensão e da Deformação 52

5.1.1 Placa D1 ..... *52*

5.1.2 Placa D2 ..... *58*

5.2 Influência da Temperatura e da Umidade 63

5.2.1 Placa D3 ..... *63*

5.2.2 Placa D4 ..... *91*

5.2.3 Placa D5 ..... *97*

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E ETAPAS FUTURAS 105

6.1 Conclusões 105

6.2 Proposta Para Trabalhos Futuros 106

REFERÊNCIAS 107

1 INTRODUÇÃO

Structural Health Monitoring (SHM) ou monitoramento da intergidade estrutural tem como objetivo assegurar a saúde da estrutura e consequentemente manter o sistema em funcionamento sem oferecer riscos à segurança dos usuários. Uma das áreas onde, por motivos óbvios, se tem a maior aplicação deste método é o setor aeronáutico (BOLLER; STASZEWSKI, 2004).

Dentre os métodos recentes utilizados para detectar danos estruturais em aeronaves, pode-se citar os métodos da impedância eletromecânica e de ondas de Lamb. Em ambos os casos a superfície monitorada é limitada e quando se deseja ampliar esta área é necessário aumentar a quantidade de sensores piezelétricos, o que faz com que aumente também a quantidade de fiação e sistemas de aquisição, que consequentemente leva ao aumento da massa da aeronave em si. Outra limitação destes métodos é a dificuldade em se acoplar os sensores a superfícies com geometrias complexas como junções, nervuras, fixadores, materiais híbridos e dispositivos altamente amortecidos, como estruturas sanduíche de *honeycomb* (YUN et al., 2005).

Uma forma de se contornar o problema da quantidade de sensores é posicionar os sensores em locais estratégicos, os quais estatisticamente sofrem mais danos ou que são de maior importância estrutural.

Outra forma de se contornar a limitação da área monitorada foi proposta por LEE et al. (2006) no qual foram utilizados sensores piezelétricos longos e contínuos na forma de fitas, de forma que a área de influência do sensor se tornou bem maior comparado com os sensores convencionais. Utilizando diversos sensores em fita cruzados entre si foi construída uma rede de sensores, que os autores chamaram de "*neural network*" ou rede neural. O problema deste método é a utilização de sensores de material piezelétrico convencional (PZT), o qual é muito frágil e faz com que a sua utilização em forma de fita longa seja dificultada. Para contornar este problema os autores propuseram a utilização de compósitos de nanotubos de carbono (CNT).

Os CNTs são estruturas orgânicas, compostos de longas cadeias de carbono, que possuem alta condutividade elétrica, alta condutividade térmica e alta resistência mecânica, dependendo da quiralidade. Além das boas características elétricas e mecânicas, os CNTs possuem a vantagem de que podem ser misturados a uma matriz polimérica, formando assim

um compósito com características físicas e químicas específicas. Através do controle da porcentagem em massa dos nanotubos, do tipo de polímero e da funcionalização dos nanotubos é possível desenvolver diversos tipos de sensores e atuadores, de acordo com as necessidades de cada aplicação. Este processo é chamado de "*tailoring*".

Através do processo de *tailoring* consegue-se fabricar materiais compósitos com características específicas, tais como piezoresistividade, atuação eletroquímica, maior resistência mecânica, maior condutividade elétrica ou térmica entre outras.

Avaliando-se os atuais métodos de SHM utilizando CNTs, chega-se a conclusão de que as características chaves para o funcionamento destes sistemas são a condutividade elétrica e o efeito piezelétrico. Com isso em mente, buscou-se uma parceria com o Instituto de Química (IQ) de Araraquara (UNESP – Campus de Araraquara) com o intuito de se buscar alternativas de nanomateriais que possuíssem tais características e assim desenvolver métodos alternativos para detecção de falhas.

Para isto recorreu-se ao Prof. Dr. Marcelo Ornaghi Orlandi, professor do IQ de Araraquara, que desenvolve diversos trabalhos relacionados à nanocompósitos. Entre eles podemos citar o trabalho de Arlindo et al. (2012) no qual se pode verificar estudos relativos a condutividade elétrica de nanocompósitos de ITO (*Indium Tin Oxide* ou óxido de índio dopado com estanho) em matriz de PMMA (polimetil-metacrilato), o trabalho de autoria própria (ORLANDI; MARCELO ORNAGHI et al., 2006) o qual apresenta estudos relacionados a métodos para o crescimento de *nanobelts* de SnO (*tin oxide* ou óxido de estanho) e o trabalho de Carreño et al. (2009) o qual mostra um processo efetivo de revestimento de *nanobelts* de SnO_2 por nanoestruturas de carbono.

Após uma análise dos pré-requisitos e pesquisas na literatura, chegou-se a um conjunto de nanomateriais que correspondem aos pré-requisitos e que poderiam ser produzidos no Instituto de Química. São eles as nanoestruturas de ZnO, SnO, SnO_2, Sn_3O_4 e TiO_2. Sendo que alguns deles como o ZnO possuem características piezelétricas (DESAI; HAQUE, 2007) e outros como o TiO_2 possuem alta condutividade elétrica (ARLINDO et al., 2012).

Devido ao tempo limitado para a pesquisa no mestrado, optou-se por estudar somente os sensores de ITO (In_2O_3) para aplicação em SHM.

O Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes (GMSINT – UNESP, campus de Ilha Solteira) realiza diversos trabalhos em parceria com o setor aeronáutico, tanto no desenvolvimento de tecnologias utilizando materiais inteligentes como no desenvolvimento de técnicas de monitoramento e detecção de falhas. O grupo GMSINT, no qual este trabalho

está sendo desenvolvido, também faz parte de um projeto INCT (Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia – CNPq), que possui parceria com a EMBRAER de forma a incentivar pesquisas relacionadas a sistemas inteligentes focadas no setor aeronáutico. Portanto, a presente proposta está inserida neste contexto de pesquisa, mas diferentemente das pesquisas atuais desenvolvidas pelo grupo, busca a aplicação de um tipo de sensor até então não utilizado pelo grupo e ainda não explorado no Brasil em trabalhos de monitoramento de danos estruturais.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é projetar um filme delgado de nanocompósito de ITO e verificar a possibilidade de se utilizar este nanocompósito para detectar e localizar o dano.

1.2 Motivação Para A Execução Do Trabalho

Estatísticas indicam que cerca de 31% das falhas em estruturas metálicas em aeronaves é causada por desenvolvimento de trincas de fadiga, tabela 1. Com o intuito de aumentar a confiabilidade das aeronaves e assim reduzir a quantidade de acidentes causados por falhas estruturais, diversos estudos são desenvolvidos no sentido de desenvolver técnicas mais avançadas de monitoramento e detecção de trincas e falhas em estruturas metálicas.

Em geral a maior parte da estrutura metálica em aeronaves é constituída de chapas de alumínio, constituindo uma porcentagem que varia entre 60% a 80% da porcentagem global de material da aeronave (REZENDE, 2007). Levando em conta tais dados, optou-se em realizar experimentos utilizando chapas de alumínio, de forma a simular estruturas aeronáuticas.

Tabela 1 – Causas de falhas em estruturas metálicas em aeronaves.

Tipo de falha	**Número de falhas**	**Porcentagem**
Desenvolvimento de trincas de fadiga	100	30,96%
Corrosão	82	25,39%
Colagem/descolagem de juntas	70	21,67%
Trincas de corrosão por tensão	47	14,55%
Danos de impacto	24	7,43%

Fonte: (BOLLER; STASZEWSKI, 2004)

Atualmente, há uma grande tendência em se utilizar materiais compósitos na estrutura primária de aeronaves, como por exemplo, o Boeing 787, que foi o primeiro avião com mais que 50% de material compósito na estrutura. No entanto, a escolha por estruturas metálicas se deve ao grande número de aviões existentes que utilizam este material e a possibilidade de estender esta metodologia a outros sistemas mecânicos.

Como citado anteriormente, dentre os métodos de detecção de danos em estruturas estão o método da impedância eletromecânica e o método de ondas de Lamb. O GMSINT possui um longo histórico de pesquisas em ambos os métodos e busca com este trabalho gerar uma frente de pesquisa multidisciplinar, focado em nanocompósitos, através de uma parceria com o Instituto de Química (IQ) de Araraquara.

2 MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

2.1 Introdução

Um dano em um sistema estrutural ou mecânico pode ser definido como: “Alterações intencional ou não das propriedades do material e/ou geométricas do sistema, incluindo alterações nas condições de contorno e conectividade do sistema, o qual afete adversamente o desempenho atual ou futuro daquele sistema” (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005, p. 23). Embora o dano em um sistema seja algo indesejável, é impossível que haja um sistema imune a danos e, consequentemente, todo sistema inevitavelmente está fadado a falhar algum dia. No entanto, mesmo o dano sendo algo inevitável, é possível que se consiga identificar o surgimento de danos incipientes e acompanhar seu desenvolvimento durante a operação do sistema. Este conceito é chamado de diagnóstico de danos. Se for possível modelar o sistema incluindo a influência do dano e das condições de operação, como por exemplo, a variação de cargas e temperatura, pode-se atingir a fase de prognóstico do dano e, assim, determinar o tempo restante de vida útil do sistema.

Uma das ferramentas para se averiguar a condição em que um dado sistema se encontra e assim detectar possíveis danos é designado *Structural Health Monitoring* (SHM), ou monitoramento da integridade estrutural. Para que se consiga detectar os danos através de técnicas de SHM, utiliza-se uma série de sensores, posicionados estrategicamente ao longo da superfície monitorada, de forma a se obter uma série de dados lidos ao longo do tempo. A informação retirada destes sensores são sensíveis ao aparecimento de danos, ou seja, quando existe a presença de um dano, aquele sinal sofrerá alguma alteração, que pode ser comparada com o sinal do sistema saudável (comumente chamado de *baseline*). Dessa forma, através do acompanhamento da evolução destes sinais ao longo do tempo, consegue-se não só verificar o “envelhecimento” do sistema como também avaliar o efeito de alguns eventos prejudiciais, como terremotos, por exemplo.

Tendo-se em mãos os dados em tempo real da condição de saúde do sistema, pode-se avaliar cada situação e tomar atitudes apropriadas para que se consiga de certa forma corrigir o dano e com isto adiar, ou programar, o período para manutenção do sistema.

Seguindo-se esta ideia da manutenção preditiva utilizando SHM como ferramenta de predição, ouve o surgimento do conceito de estruturas adaptativas. Segundo Lopes Júnior e Silva (2005) , uma estrutura adaptativa conseguiria, em tese, resistir a falhas não só em

condições de carregamento a qual ela foi projetada para suportar, mas também ela conseguiria resistir a cargas excessivas inesperadas, através da atuação de um sistema apropriado. Caso este sistema não consiga atuar autonomamente diante dessas cargas inesperadas, ele acionaria algum tipo de alarme que indicaria para um operador a necessidade de reparos. Com o advento dos materiais ditos "inteligentes" ou *smart materials* tem-se conseguido criar cada vez mais alternativas de sensores e atuadores para este propósito.

2.2 Fatores que Interferem na Detecção de Danos

Como descrito previamente, os métodos de Impedância eletromecânica e das Ondas de Lamb, têm como principal filosofia a comparação de sinais medidos, no qual qualquer alteração que ocorra no sinal seria uma indicação de um dano. Em ambientes de laboratório, em que as condições de trabalho são controladas para serem sempre (tanto quanto possível) as mesmas, essa filosofia se mostra bastante eficaz, já que a única variável presente nas medições é o próprio dano. No entanto, em condições reais de operação, fatores como temperatura, umidade e variações de carga não podem ser controlados, e na maioria dos casos, esses fatores influenciam as medições e consequentemente geram falsos diagnósticos.

Diversos trabalhos têm sido realizados ao longo dos anos, com o intuito de se desenvolver técnicas para evitar ou filtrar tais influências nas medições. Park et al. (1999) estudaram as influências da temperatura na técnica da impedância eletromecânica, verificando que a temperatura afeta mais a parte imaginária da impedância do que a parte real e que a temperatura causa um deslocamento horizontal dos picos das FRFs (*Frequency Response Function*), concluindo que o aumento da temperatura causa um deslocamento dos valores de frequências de ressonância para a esquerda (redução das frequências de ressonância). Além disso Park et al. (1999) desenvolveram um método empírico para "filtrar" as influências da temperatura nas medições de impedância, pois foi constatado que a temperatura pode efetivamente interferir no diagnóstico de danos. Koo et al. (2009) desenvolveram um trabalho similar no sentido de tentar compensar o efeito da temperatura, no entanto neste caso foi utilizado um método de EFS (*Effective Frequency Shift*) pela correlação dos sinais para corrigir o desvio causado pela temperatura.

Alguns trabalhos envolvendo temperatura também foram realizados por integrantes do GMSINT, como os de Gonsalez (2012) e França (2014). Gonsalez (2012) utilizou o método

de *Fuzzy c-means* para diagnosticar o dano mesmo com variações de temperatura. França (2014) treinou uma RNA (Redes Neurais Artificiais) para identificar e localizar o dano em uma placa de material compósito independente da influência da temperatura.

De forma semelhante à temperatura, foi constando também que variações nas cargas aplicadas à estrutura também alteram as medições de impedância.Yang et al. (2015) verificaram que um aumento na carga axial da estrutura causa uma diminuição nas curvas de admitância (inverso da impedância). Yang et al. (2015) também obtiveram sucesso em utilizar RNAs para compensar of efeitos da variação de carga nos diagnósticos de falhas.

2.3 Rede De Sensores

Schulz et al. (2001) propuseram a utilização de uma "*neural network*" para o monitoramento de uma ampla área capaz de não só detectar um dano como também encontrar sua localização e avaliar seu tamanho. O conceito de "*neural network*" utilizado por Schulz et al. (2001) difere do conceito computacional de "redes neurais artificiais" (*Artificial Neural Network*), que consiste em um sistema de processamentos de dados baseados no cérebro humano o qual é amplamente utilizado em aplicações de SHM para analisar uma série de dados obtidos de estruturas em diferentes estados (com dano, sem danos, com variação de temperatura, com variação de temperatura e dano, etc) e assim "aprende" a discernir quando um dado conjunto de dados corresponde ou não a um dano ou se é simplesmente ruído, ou alterações ambientais, interferindo nas medições.

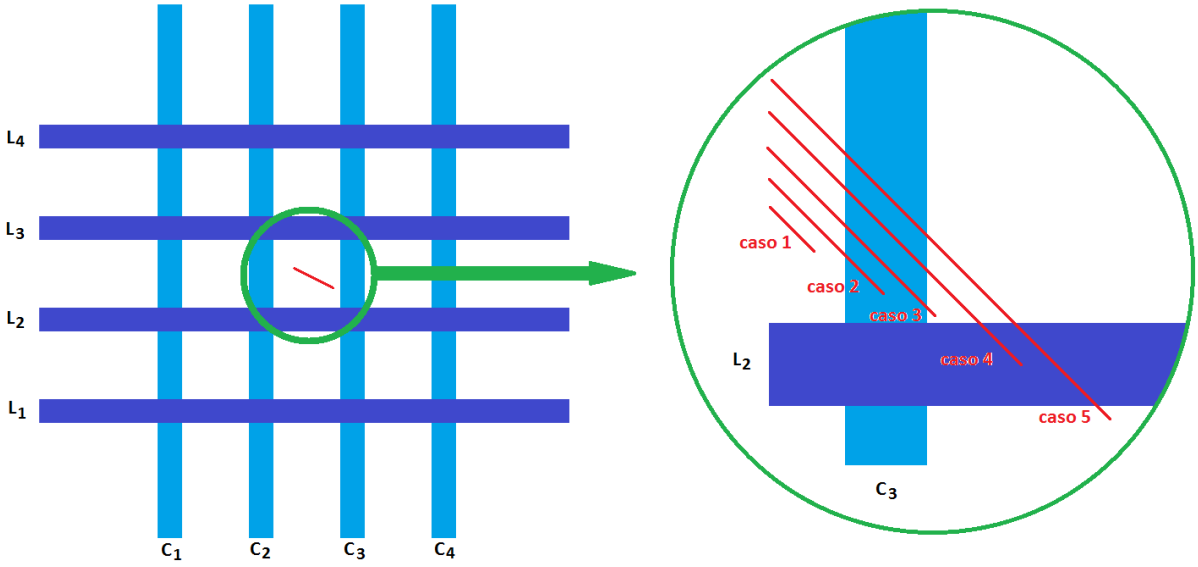
Se pensarmos que as redes neurais de certa forma imitam o sistema nervoso humano, as redes neurais neste trabalho se refeririam à parcela "sensitiva" do sistema e não a parcela "cognitiva". Dessa forma uma tradução mais apropriada para "neural network" neste caso seria "rede de nervos", ou seja, um conjunto de sensores (nervos) entrelaçados formando uma rede. De forma simplificada, este sistema nervoso é constituído de diversos neurônios interligados de forma a constituírem diversos "níveis". Cada neurônio teria a capacidade de, dependendo do nível da intensidade a qual ele é estimulado, "emitir" um estímulo ao neurônio do nível superior. Dessa forma o neurônio do nível mais inferior seriam os sensores, os quais recebem estímulos externos (no caso do corpo humano, seriam estímulos visuais, auditivos, táteis, etc) e caso este estímulo tenha uma intensidade que ultrapasse certo limite, esse neurônio transmite um estímulo para o neurônio superior. A diferença no neurônio superior é

que ele recebe estímulos de diversos neurônios inferiores, cada um com uma intensidade diferente. Dessa forma o neurônio do nível superior filtra os sinais de todos os neurônios inferiores de forma que somente o estímulo com maior intensidade seja transmitida para o nível seguinte. Esse processo se repete até que o estímulo atinja o nível mais superior e a informação assim é interpretada. Os limites de intensidade a qual cada neurônio necessita ser estimulado para que transmita tal estímulo para o próximo nível está relacionado com o aprendizado do sistema. A rede neural animal tem a capacidade de constantemente ajustar esse valor limite de acordo com a sua necessidade, tendo inclusive a capacidade de gerar novas conexões com outros neurônios caso seja necessário (SCHULZ et al., 2001).

Na proposta idealizada por Schulz et al os neurônios eram constituídos de longas fitas de cerâmicas piezelétricas ligados a um condicionador de sinal "TBIM" (*Transducer Bus Interface Module*), que tinha ao mesmo tempo a função de condicionar o sinal e também interpretar o dado em nível local. O conjunto sensor/TBIM exercia a função de um neurônio, ou seja, cada um desses conjuntos tinha a capacidade de adquirir um sinal (emissão acústica) e comparar este sinal a um padrão pré-definido ou "treinado". Todos os neurônios enviavam os seus respectivos sinais ao computador, que interpretava o conjunto de sinais e avaliava a condição da estrutura. Caso a estrutura fosse considerada saudável, nenhuma ação era tomada. Caso a estrutura fosse considerada alterada por efeitos ambientais, o computador enviava um comando através do controlador TBC (*Transducer Bus Controller*) para definir um novo "padrão de treinamento" para que aquele tipo de sinal não seja mais "visualizado" pelos TBIMs. Caso a estrutura fosse considerada com "dano pequeno" ou "dano grande" o sistema registrava todas as informações referentes ao sistema e informava um operador para tomar as devidas providências para evitar a falha do sistema.

Com o avanço dos nanocompósitos, o grupo de Schulz et al 2001 propôs a substituição dos sensores piezocerâmicos por sensores de nanocompósitos de MWCNTs em matriz de PMMA. A figura 1 mostra o sistema proposto por Yun et al. (2005).

Figura 1 – Rede de nervos de nanocompósitos.



Fonte: adaptado de Yun et al. (2005)

Neste caso os neurônios são as fitas L1 a L4 (horizontais) e C1 a C4 (verticais) e os possíveis danos são indicados pelos diversos "casos", representados por linhas vermelhas. A ideia básica é que quando existe algum dano as fitas sofrem algum tipo de alteração em suas características físicas, as quais podem ser percebidas por um sistema de aquisição. Desta forma quando um dano afeta a medição de C3 (caso 2 e 3), por exemplo, sabemos que o dano está nas proximidades deste nervo. Caso nenhum dos outros neurônios apresente alterações, não saberemos exatamente em que altura está o dano No entanto quando o dano crescer a ponto de afetar o nervo L2 (caso 4), por exemplo, neste momento saberemos a posição possível do dano, que seria a área entre L2, L3, C3 e C4.

Através da observação da figura 1, podemos imediatamente identificar uma deficiência deste sistema com relação a precisão da identificação do dano, pois depende diretamente de quão refinado é a rede, ou seja, quanto menor for a distância entre neurônios, menor o dano capaz de ser identificado. Da mesma forma, quanto mais fina a malha melhor será a predição do tamanho e localização do dano. Inspirado na ideia em se utilizar nanocompósitos para recobrir a área a ser monitora e com elas compor os neurônios, os autores citados propuseram inicialmente o estudo dos nanocompósitos, principalmente os nanocompósitos de nanotubos de carbono.

3 NANOCOMPÓSITOS

3.1 Introdução

Para se entender a definição de nanocompósitos, deve-se primeiro estabelecer alguns princípios básicos de ciências dos materiais, assim como o que são compósitos e o que são nanomateriais. Unindo-se estes conceitos, pode-se facilmente entender o conceito de nanocompósitos.

O primeiro conceito a ser definido é o conceito de "materiais" em si. Embora seja um conceito amplamente aceito mesmo entre leigos, a definição de materiais não é algo tão intuitivo quanto parece, embora seja um conceito simples. A questão principal para se entender o que é "material" é entender a diferença entre material e matéria. Segundo Zarbin (2007), "toda matéria é um material potencial" e, o que define se uma matéria é ou não um material é a sua aplicação. A partir do momento em que se encontra uma função para as propriedades (mecânicas, elétricas, químicas, etc) de uma dada matéria, ela passa a ser um material.

Com isto em mente, pode-se definir os tipos de materiais. Uma forma comum, porém ultrapassada, de se classificar os tipos de materiais é dividi-las em metais, polímeros, cerâmicas e semicondutores.

Se o material for composto de um elemento metálico (ferro, cobre, alumínio, etc) ou uma mistura de metais (ligas de aço) ele é classificado como metal. As características principais dos metais são a alta condutividade tanto elétrica como térmica e boas propriedades mecânicas.

Caso seja constituído de uma repetição de longas moléculas, sejam elas orgânicas ou inorgânicas, ele será um polímero. Os polímeros possuem baixa condutividade elétrica e térmica, não apresentam boa resistência mecânica e falham quando submetidas a altas temperaturas, porém podem apresentar características específicas, como boa aderência, transparência, elasticidade, baixo custo, entre outras, dependendo de cada tipo de polímero.

Os materiais inorgânicos como óxidos, sulfetos, nitretos, carbetos, silicatos e carbanatos são classificados como cerâmicos. Geralmente são utilizados como isolantes térmicos, apresentam boa resistência térmica e alta dureza, no entanto possui baixa tenacidade, o que faz com que quebrem quando submetidos a impactos.

Um material que apresente uma condutividade intermediária entre o condutor e o isolante é considerado um semicondutor. Estes materiais a baixas temperaturas não possuem boa condutividade, no entanto, quando atingem certa temperatura a sua condutividade aumenta, sendo que a magnitude em que o material se torna condutivo depende do tratamento a qual ele é submetido. O tratamento químico realizado para se aumentar a condutividade de tais materiais é chamado de dopagem e um elemento químico comumente utilizado para se criar semicondutores é o silício. Esses materiais apresentam características aplicáveis na indústria eletrônica e de tecnologia de comunicação.

O último tipo de material é o material compósito. A definição simplificada de um compósito é a de que ele é um material constituído de uma junção de dois ou mais tipos de materiais com o intuito de se obter um novo material, com propriedades intermediárias entre seus constituintes. A grande vantagem dos compósitos é que se consegue projetar o material de acordo com as propriedades necessárias para cada aplicação, tornando-os materiais versáteis e com alto valor industrial. São exemplos destes a fibra de vidro, o concreto, madeiras, entre outros.

Embora em alguns casos o material compósito aparente ser constituído de um único material, como por exemplo, o papelão ou a placa de fibra de carbono, esses materiais geralmente necessitam de um segundo material para colar as diversas camadas do material principal (matriz) para formar assim um único material. Nestes casos, apesar do material da matriz exercer a maior parte da função estrutural e mecânica do material, o material secundário é essencial ao conjunto, pois além de manter as diversas camadas do material da matriz unidos, ele também pode exercer funções como impermeabilização, proteção do material primário a corrosões, aumento na rigidez, entre outras, dependendo dos tipos de materiais usados. Uma característica interessante dos compósitos como as placas de fibra de carbono é que eles aproveitam as propriedades anisotrópicas do material a favor do compósito. No caso das placas de fibra de carbono, por exemplo, quando se forma uma placa através da união de diversas fibras de carbono alinhadas umas com as outras se consegue obter um material com boa resistência no sentido axial das fibras, no entanto, ao aplicar-se uma tensão no sentido radial, as fibras se separam oferecendo pouca ou nenhuma resistência, no entanto, ao se unir duas placas de forma que as fibras da segunda fiquem perpendiculares às fibras da primeira consegue-se uma placa resistente à tração mecânica em duas direções. Esse processo pode ser repetido para melhorar cada vez mais as propriedades mecânicas da placa.

O motivo da classificação dos materiais descrita acima ser considerada ultrapassada por muitos autores é o fato de que hoje em dia com os avanços da nanotecnologia não se pode mais dizer, por exemplo, que um material condutor é um metal, pois existem materiais que não compostos somente de elementos metálicos mas que conduzem eletricidade tal como um metal. Além disso, introduziu-se o conceito de materiais com estruturas nano ou nano materiais, os quais são materiais que têm suas propriedades alteradas quando produzidas em dimensões nanométricas. Com o surgimento dos nanomateriais vieram também os nanocompósitos, que são compósitos constituídos de materiais nanométricos.

Com isto, Allen (1991) propões uma nova classificação dos materiais: metais e ligas metálicas, materiais inorgânicos, materiais orgânicos, materiais biológicos e polímeros. Essa classificação seria mais abrangente e capaz de contemplar um maior número de diferentes materiais (ZARBIN, 2007).

Winey e Vaia (2007), Martins e Trindade (2012), Niroumand e Zain (2013), entre outros, definem que o nanomaterial é aquele que possui ao menos uma das dimensões entre 1 a 100 nm. O fato de se trabalhar nessa faixa de dimensões gera duas consequências fundamentais para sua viabilidade em aplicações práticas: a redução no tamanho das estruturas e o consequente aumento na área superficial. Estas características por si só não implicam em vantagens práticas, no entanto quando se utiliza estes materiais como aditivos para materiais compósitos o tamanho das estruturas utilizadas como aditivos exercem grande influência nas propriedades do material resultante. Segundo Zarbin (2007), quando estas estruturas atingem um tamanho menor que certo valor crítico as suas propriedades passam a ser amplamente influenciadas pelo seu tamanho e também por sua geometria. Esse tamanho crítico varia para cada tipo de material e varia também para cada propriedade do material. Com isto, nota-se que não se deve fixar a um valor arbitrário de 1 a 100 nm, por exemplo, como definição de nanomaterial, já que o material também deve estar abaixo do tamanho crítico para uma ou mais propriedades. Um material com estrutura na faixa dos nanômetros, mas que não está abaixo do tamanho crítico de nenhuma propriedade não pode ser considerado nanomaterial.

As propriedades largamente exploradas pela literatura e que apresentam grande potencial para aplicações práticas são as propriedades elétricas (condutividade) e óticas (transparência e absorção/emissão de luz). Quando se utiliza um aditivo para proporcionar condutividade a um material isolante existe um valor de porcentagem de massa (wt %) a qual ocorre um aumento drástico na condutividade, fazendo com que o compósito passe de isolante para condutor. Essa porcentagem é chamada de **limite de percolação.**

Uma definição interessante que em geral é encontrado na literatura em conjunto com os nanomateriais e nanocompósitos é o conceito de materiais "multifuncionais". Gibson (2010) define os materiais multifuncionais como materiais que executem múltiplas funções estruturais, combinam funções estruturais e não estruturais, ou ambos. O autor também afirma que tais materiais devem ser necessariamente compósitos. A implicação direta da utilização deste material é que se consegue criar uma única estrutura que apresente mais de uma função, o que reduziria o tamanho/peso e a quantidade de material bruto necessário, o que implicaria, a longo prazo, em redução de custo.

Desta forma, o grande atrativo dos nanocompósitos é que se pode, com as técnicas e materiais apropriados, criar materiais com propriedades melhoradas ou com novas propriedades incorporadas a elas, com a simples adição de porções muito pequenas de nanomateriais como aditivos. Segundo Winey e Vaia (2007) com adição de um a cinco por cento de massa de aditivo já se consegue variações significativas nas propriedades. O fato de se poder melhorar as características do material da matriz sem a necessidade de se adicionar proporções grandes de algum outro material é importante, pois quanto maior a quantidade de aditivos, maior a perda de propriedades da matriz. Neste caso, o nanocompósito praticamente não perde propriedades, só adiciona mais propriedades à matriz.

3.2 Nanotubos De Carbono

Os nanotubos de carbono (CNT – *carbon nanotubes*) são longas cadeias de carbono, as quais apresentam uma estrutura tubular e seu diâmetro tem dimensões nanométricas.

As estruturas dos CNTs ocorrem em duas formas: "Os nanotubos de parede simples, que podem ser considerados como uma única folha de grafite enrolada sobre si mesma para formar um tubo cilíndrico e os nanotubos com paredes múltiplas, que compreendem um conjunto de nanotubos concêntricos" (HERBST; MACÊDO; ROCCO, 2004, p. 986).

Por questões de praticidade, definimos os nanotubos de parede simples pela sua sigla em inglês SWCNTs (*Single-Walled Carbon Nanotubes*) e os nanotubos de paredes múltiplas como MWCNTs (*Multi-Walled Carbon Nanotubes*).

As principais características dos CNTs são a alta condutividade elétrica, na qual dependendo a quiralidade podem ser metálicos ou semicondutores, alta resistência mecânica e alta condutividade térmica.

Wernik e Meguid (2010) reveem diversos autores e comparam os dois tipos de nanotubos quanto a suas dimensões e propriedades. Quanto as suas dimensões, cita que os SWCNTs possuem diâmetros de 0,4nm a 2nm enquanto os MWCNTs variam entre 5 e 100nm. Com relação a propriedades mecânicas, diversos autores concluíram que o módulo de Young dos SWCNTs em geral é maior que o dos MWCNTs. Em relação a suas propriedades elétricas, os SWCNTs em médias apresentaram condutividade elétrica maior que os MWCNTs, no entanto dependendo das características da camada mais externa do conjunto de tubos a condutividade do MWCNT pode ser maior que a dos SWCNTs. Por fim quanto as propriedades térmicas, Wernik e Meguid (2010) explica que a avaliação da condutividade térmica dos CNTs é complicada, já que esta propriedade depende da temperatura a qual o nanotubo está submetida, sendo que até um valor de pico, a condutividade aumenta com o aumento da temperatura e depois deste pico a condutividade diminui com o aumento da temperatura. Comparando-se somente os valores de pico de condutividade, conclui-se que a condutividade nestes pontos é maior nos SWCNTs.

Apesar dos CNTs apresentarem boas propriedades, sua produção é demorada e cara. Por esse motivo os CNTs são utilizados principalmente como aditivos em nanocompósitos, nos quais já se consegue produzir compósitos com matrizes de polímeros com propriedades mecânicas e/ou elétricas melhoradas.

3.3 Nanocompósitos de CNT em SHM

Existem diversas formas de se utilizar nanotubos de carbono em SHM. Em geral os nanocompósitos de CNTs são aplicados como revestimento da superfície ou inseridos no próprio material. A grande vantagem da primeira opção é que com a aplicação de um revestimento na superfície monitorada se consegue contornar tanto a questão da eliminação de grande quantidade de sensores como também a questão da dificuldade em se fixar sensores em superfícies complexas. A segunda opção tem a vantagem de que os “sensores” estão inseridos no material monitorado, não tendo a necessidade de se fixar sensores externos, sendo uma ótima opção para estruturas compostas de materiais poliméricos ou compósitos, no entanto a sua manutenção se torna complexa, pois os sensores fariam parte da estrutura e se houver a necessidade de realizar uma manutenção nos sensores, a estrutura inteira seria

afetada ou trocada, ou seja, haverá a necessidade de se realizar uma manutenção na estrutura sem ela estar danificada.

Rainieri et al. (2011) estudaram a utilização de SWCNT na forma de filmes, comumente chamados de "*buckypaper*", inseridos em uma matriz de cimento, para aplicação em estruturas civis. Estudos indicam que os CNTs puros são frágeis devido ao tipo de ligação intermolecular (forças de Van der Waals), portanto, é necessária a utilização de CNTs inseridos em uma matriz polimérica para evitar o escorregamento entre os NTs (nanotubos) e em seguida insere-se este nanocompósito ao sistema a ser estudado.

Kang et al. (2006) propuseram (mas ainda não aplicaram efetivamente) a utilização de um nanocompósito de PMMA (polimetil-metacrilato, mais conhecido como acrílico) com MWCNT aplicados na forma de spray sobre uma superfície a ser monitorada, formando assim um compósito transparente e de fácil aplicação. Após o revestimento da superfície, monitora-se a resistência elétrica do filme de forma que com o aparecimento de trincas a resistência elétrica entre dois pontos monitorados da placa aumente. Este processo continua até que a trinca atinge tamanho suficiente para romper completamente o filme, o que resulta em uma condutividade nula indicando que a falha atingiu um tamanho crítico.

Liu et al. (2012) propuseram a utilização de MWCNTs inseridos em uma matriz de epoxy, com o intuito de monitorar junções coladas de duas lâminas de CFRP (*Carbon-fiber-Reinforced Polymer).* Abot et al. (2010) utilizaram fios revestidos (epoxy ou polyurethano) de CNTs que foram "costurados" entre as fibras de um laminado polimérico com a intenção de detectar a delaminação da mesma. Neste caso não havia a possibilidade da utilização de filmes delgados, já que o material é constituído de fibras cruzadas entre si formando uma rede e a colagem de um filme sobre tal rede seria intrusivo ao sistema e ofereceria uma medida irreal do estado de integridade estrutural do sistema.

Ashrafi et al. (2012) utilizaram dois tipos de filmes de SWCNT em matriz de epoxy colados no início e no fim de uma trinca em uma chapa de alumínio. Os dois filmes possuem composições diferentes, isolamentos diferentes e formas de instalações diferentes e, ambos foram eficientes no acompanhamento da propagação da trinca através do monitoramento da variação da resistência elétrica.

Zhou et al. (2011) realizaram experimentos envolvendo uma ideia semelhante a ideia dos filmes de SWCNT citados anteriormente, no entanto, utilizando fios magnéticos. Embora tal experimento não utilize CNTs, o filme utilizado é semelhante ao proposto por KANG et al. (2006) e foi igualmente efetivo no acompanhamento do crescimento da trinca em uma placa.

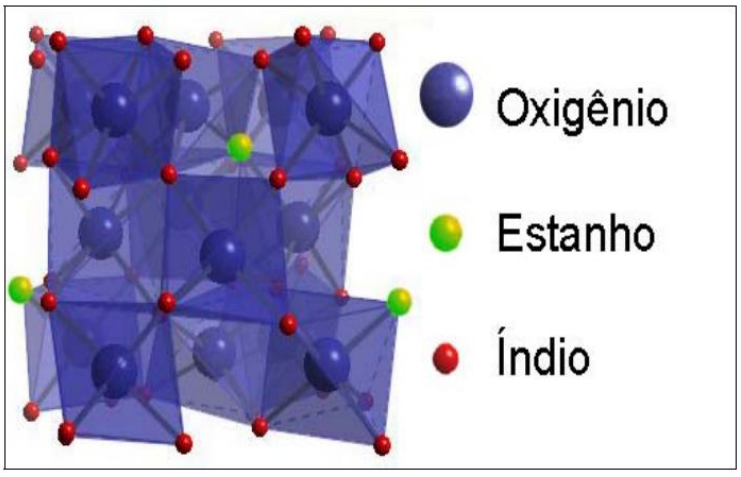
Rams et al. (2012) propuseram a utilização de MWCNTs distribuídos na superfície de compósitos de epóxi com o intuito de se medir a resistividade elétrica da superfície e assim através de ensaios de tração verificaram a relação entre a tensão, deformação e a resistência. Dessa forma foi verificada a possibilidade de se monitorar a integridade estrutural do compósito pela leitura dos valores da resistência.

Sebastian et al. (2014) propuseram a utilização de fios compostos de CNTs sintetizados sobre fibra de vidro, para serem inseridos diretamente nas camadas intermediárias das lâminas de fibra de carbono e, com isto utilizar as características de piezoresistividade do compósito de CNT para medir tensões de tração aplicadas sobre as placas.

3.4 Óxido de Índio Dopado com Estanho

O óxido de índio (In_2O_3) dopado com estanho é uma das possíveis composições do sistema chamado ITO, sendo que a outra estrutura é o óxido de estanho (SnO_2) dopado com índio. Em ambos os casos a estrutura é composta por óxidos semicondutores com elementos dopantes, que faz com que o sistema possua um maior número de "portadores livres" e os portadores por sua vez são responsáveis por proporcionar condutividade ao sistema. A figura 2 mostra a estrutura cristalina do óxido de índio dopado com estanho.

Figura 2 – Representação da célula unitária do óxido de índio dopado com estanho.



Fonte: Retirada de (LEGNANI, 2002)

Quanto as suas propriedades, de forma resumida, o ITO e alguns outros óxidos semicondutores dopados podem demonstrar uma combinação interessante e tecnologicamente importante de propriedades: eles possuem alta transmitância luminosa, alta refletância ao infravermelho, boa condutividade elétrica, excelente aderência ao substrato, dureza e são quimicamente inertes (HAMBERG; GRANQVIST, 1986).

Grande parte dos estudos encontrados na literatura sobre o ITO refere-se a aplicações na forma de filmes finos. Isto se deve ao fato de que desde os primeiros relatos sobre filmes condutores e transparentes a aplicação principal destes materiais era o setor de desenvolvimento de dispositivos eletrônicos, mais especificamente nos displays de cristal líquido, eletrodos transparentes para painéis solares e fotodetectores (TAHAR et al., 1998), além de aplicações em outras áreas como filmes refletores de calor, sensores de gás e revestimentos protetores. (DAWAR; JOSHI, 1984).

Abre-se um parêntese neste ponto para discutir o tópico dos métodos de deposição dos filmes finos, já que além de ter relação com as estruturas nano, este tópico também discute um dos processos utilizados para criar os terminais os quais são realizadas as ligações elétricas aos sensores desenvolvidos neste trabalho que é o método de *sputtering*, no entanto, não será discutido detalhes específicos de cada método, já que não é o enfoque deste trabalho.

Manifacier (1982) e Dawar e Joshi (1984) descrevem a deposição química de fase vapor, a deposição por spray e a pulverização catódica.

A deposição química em fase vapor (*Chemical Vapour Deposition* – CVD) é um método no qual o precursor (material que será depositado para formar o filme) é carregado na forma de vapor por um fluxo de gás inerte até um substrato também aquecido. O vapor reage ou se decompõe no substrato e se deposita em sua superfície formando o filme. O CVD também é utilizado para sintetizar CNTs.

Técnicas em spray utiliza o composto inicial misturada dissolvida a um solvente. Esta mistura é pulverizada sobre uma superfície aquecida, formando um filme sobre ela.

A pulverização catódica ou *sputtering* é um processo no qual uma peça de material sólido (denominado *target*) é bombardeado com partículas de energia. Com o bombardeamento, partículas do sólido são ejetadas e se depositam sobre um substrato. Esse método é utilizado neste trabalho para se depositar uma fina camada de ouro sobre o nanocompósito para se soldar terminais elétricos sobre eles.

Além dos métodos descritos anteriormente, existem variações destas e também métodos novos em desenvolvimento que buscam melhorar a uniformidade do filme depositado, já que esta é uma das dificuldades encontras na maioria dos casos.

Com o sucesso dos filmes de ITO e também com o recente desenvolvimento das estruturas nano, iniciaram-se estudos sobre a síntese e a aplicação de nanofitas de ITO e assim Orlandi et al. (2005) desenvolveram um trabalho no qual nanofitas de ITO foram sintetizadas com sucesso através do processo de redução carbotérmica.

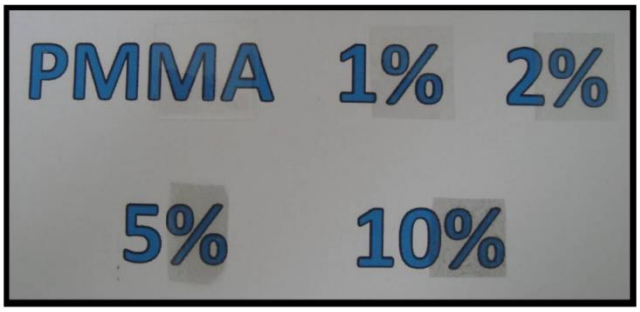
As nanofitas de ITO são materiais 1D, ou seja, são materiais os quais duas de suas dimensões apresentam proporções nanométricas, com secção transversal retangular ou quadrada, fazendo com que sua aparência seja similar a fitas ou bastões. A vantagem em se utilizar estas estruturas como aditivos em compósitos é que com a mistura de quantidades muito pequenas deste material com a matriz se consegue fazer com que o compósito incorpore suas características, sendo assim possível criar um nanocompósito condutor e ao mesmo tempo transparente.

O método de síntese utilizado para produzir as nanofitas é a redução carbotérmica com coevaporação de óxidos. Em geral a redução carbotérmica é um processo simples no qual o material de partida na forma de pó é vaporizado a uma elevada temperatura com o auxílio de um elemento redutor, por exemplo, o carbono e a fase de vapor resultante se condensam sob certas condições (temperatura, pressão, atmosfera, etc) para formar algum produto (THANASANVORAKUN et al., 2008).

3.5 Nanocompósito de ITO

Utilizando-se assim a matriz de PMMA, que é transparente e isolante elétrico, com adição de certa porcentagem em massa de nanofitas de ITO pode-se produzir um compósito condutor e transparente, conforme comprovado por ARLINDO et al. (2012). A figura 3 mostra os resultados obtidos por Arlindo et al. (2012) no qual diversas porcentagens de nanofitas foram testadas em nanocompósitos e suas condutividades e transparências foram medidas, de forma a se verificar o limite de percolação e também avaliar a relação entre a concentração de nanofitas, a condutividade e a transparência.

Figura 3 – Exemplos de filmes com 1%, 2%, 5% e 10% em massa de ITO por PMMA obtidos por Arlindo, 2012.



Fonte: Arlindo (2012)

Pode-se encontrar na literatura diversos métodos para a confecção de filmes de nanocompóstios. Dentre eles pode-se citar o "spin-coating", o "casting" e a deposição em spray.

No spin-coating o substrato em que o filme será depositado é colocado em rotação e o compósito, dissolvido em um solvente volátil, é despejado sobre o substrato de forma que a mistura líquida seja empurrada para as extremidades do substrato devido à força centrífuga. Conforme o solvente evapora o filme se solidifica sobre o substrato e com isso a espessura do filme pode ser controlada pela velocidade de rotação aplicada ao substrato. Maksimenko et al. (2010) tiveram sucesso em criar um filme de ITO e PVP (Polivinilpirrolidona) através deste processo.

O casting é um método mais simples, no qual se coloca uma delimitação de fita adesiva sobre o substrato e a mistura solvente/nanocompósito é despejada dentro da área delimitada. Após toda a mistura ser despejada passa-se um rolo de vidro, que pode ser o bastão de vidro utilizado para misturar soluções, sobre o líquido de forma a espalhar a mistura por toda a área delimitada. A espessura do filme será a mesma da espessura da fita adesiva.

A deposição em spray consiste em se utilizar um gás propelente para carregar a mistura líquida de nanocompósito para o substrato. Kang et al. (2006) idealizaram um método no qual se utilizava um spray de nanocompósito de SWCNT/PMMA.

Um dos desafios para se utilizar o nanocompósito de ITO para aplicações de SHM em estruturas aeronáuticas é que grande parte das estruturas utilizada nesses casos são metálicas, o que faz com que seja necessário algum tipo de isolamento entre o sensor e a estrutura. Além disto, seria necessário o ajuste da porcentagem de nanofitas de forma que o sensor apresente variações em suas medições quando ocorresse um dano. Por fim, seria interessante que o filme mantivesse sua transmitância para que fosse possível uma inspeção visual da estrutura.

4 METODOLOGIA

4.1 Introdução

O conceito básico para este trabalho é criar um filme transparente, ou o mais próximo de transparente possível, que possa ser colado à superfície de uma placa de alumínio de forma que este filme constitua uma rede de neurônios (sensores) sobre esta placa. Esta rede de sensores deve ser capaz de criar um sistema de monitoramento semelhante a pele humana, a qual quando sofre algum estímulo gera um sinal elétrico, que é interpretado pelo cérebro como uma "dor" e assim identifica a posição que sofreu o estímulo.

Com este conceito, o intuito é criar um filme que apresente uma rede de neurônios condutores constituído de várias nanofitas de ITO, na qual quando existe a ocorrência de algum dano na superfície deste filme, o "caminho" de nanofitas se parte e assim a condutividade medida neste neurônio sofre um aumento.

Para se aderir o filme a estrutura pode-se utilizar dois métodos: na primeira a confecção do filme é feita separadamente e depois é colado na estrutura; na segunda a confecção do filme é feita diretamente sobre a estrutura. Para se obter uma melhor aderência do filme a estrutura e também pela praticidade, optou-se pela utilização da segunda opção, já que o PMMA em si já possui capacidade de aderência ao alumínio suficiente para este tipo de aplicação. Para garantir ainda mais a aderência do filme, as estruturas podem ser lixadas com uma lixa fina antes da aplicação. As implicações de se utilizar este método em estruturas reais de aviação deverão ser averiguadas em trabalhos futuros.

A proposta inicial era a realização de testes com vigas de alumínio com dimensões de 30 cm, revestidos com filmes de ZnO, SnO, SnO_2, Sn_3O_4 e TiO_2 inseridos em uma matriz de PMMA para verificar a condutividade elétrica e o efeito piezelétrico em cada um dos nanocompósitos. No entanto, até aquele ponto não se conhecia ao certo quais as dificuldades em se realizar um trabalho abrangendo tantos tipos de nancompósitos, assim como a dificuldade em se criar um compósito com as proporções sugeridas. Devido às limitações de prazo para o fim do projeto, optou-se em realizar somente os estudos com os nanocompósitos de ITO/PMMA, já que este apresentou resultados mais promissores na fase de testes iniciais.

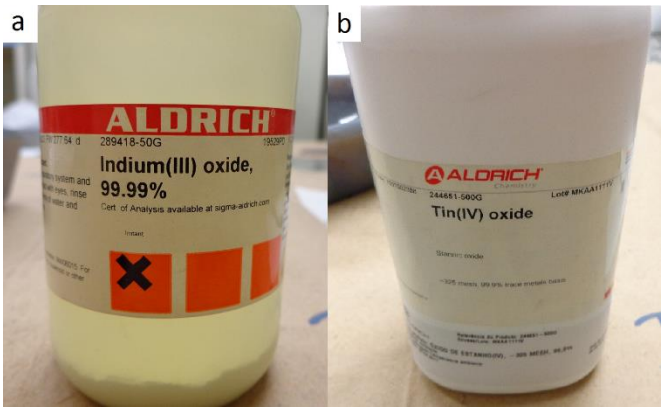
Os sinais seriam obtidos com equipamentos disponíveis no laboratório de Controle e Sistemas Inteligentes, ou seja, um sistema de medidas desenvolvido no próprio laboratório, que consta de placa de aquisição da National Instruments, usando a plataforma LabView.

Depois de realizados alguns testes iniciais, verificou-se que alguns dos parâmetros inicialmente deveriam ser alterados, por limitações tanto do nanocompósito em si, como também por não se ter um conhecimento aprofundado em relação aos instrumentos necessários para a realização dos experimentos até aquele momento. Com isto, buscaram-se novas propostas para o desenvolvimento do trabalho.

4.2 Síntese do ITO

Inicialmente procedeu-se com a síntese do ITO. Para isto, misturou-se mecanicamente o SnO_2 (Sigma-Aldrich, 99% de pureza, figura 4a) com o agente redutor (negro de fumo da Union Carbide, >99% de pureza) em uma proporção de um para um molar e realizou-se o mesmo processo para o In_2O_3 (Sigma-Aldrich, 99,99% de pureza, figura 4b).

Figura 4 – a) Óxido de índio. b) Óxido de estanho.



Fonte: Elaboração do próprio autor

As misturas foram colocadas em barcas de alumina e inseridas dentro de um tubo, também de alumina. Para aquecer o tubo utilizou-se um forno tubular da EDG Equipamentos, modelo FT-HI 40 (figura 5), disponível no laboratório do Instituto de Química da UNESP de Araraquara.

Figura 5 – Forno tubular utilizado.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A temperatura utilizada foi de zero a 1150ºC, com uma taxa de aquecimento de 10ºC/min, sendo que quando a temperatura atingia os 1150ºC o formo estabilizava este valor por 60 min. O tempo em que o forno fica estabilizado na temperatura máxima é chamado de "patamar". Durante o aquecimento se utilizou o nitrogênio comercial (99,999% de pureza) a um fluxo de 80 cm^3/min como gás de arraste. Para o resfriamento utilizou-se uma variação de temperatura de -10°C/min e o mesmo fluxo de gás de arraste.

A figura 6 mostra o resultado de uma das sínteses (ambas as imagens são da mesma síntese).

Figura 6 – Resultado de uma das sínteses de ITO.

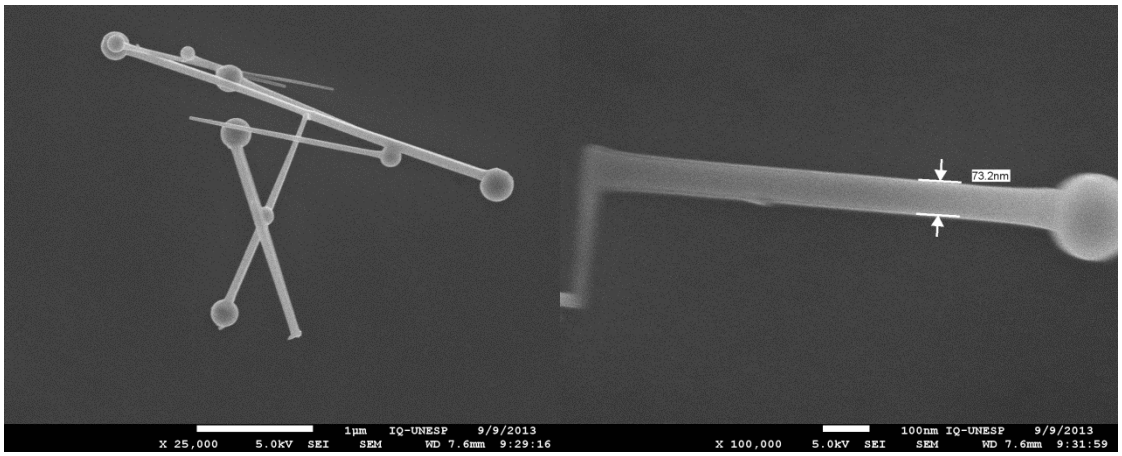


Fonte: Elaboração do próprio autor

Depois de pronta a primeira síntese, realizou-se uma verificação no FEG/MEV para se observar a morfologia das nano estruturas. Além disso, realizou-se também a verificação dos

componentes químicos presentes na amostra. A figura 7 mostra os resultados da análise no FEG/MEV.

Figura 7 – Resultado das análises no FEG/MEV de algumas nanofitas.



Fonte: Elaboração do próprio autor

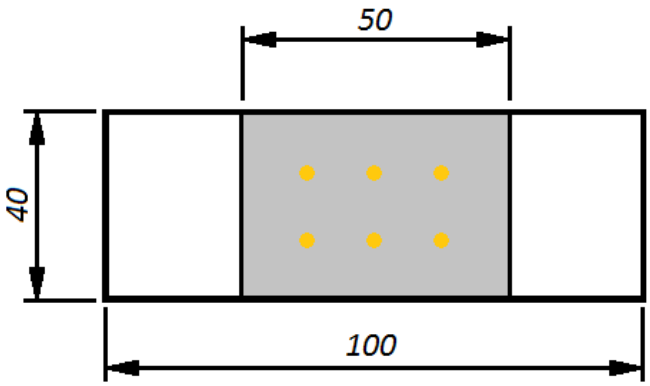
Como pode ser observado na figura 7, as estruturas formadas possuem dimensões nanométricas em sua largura/espessura.

4.3 Nanocompósito de ITO/PMMA

Com o ITO pronto, iniciou-se a confecção do nanocompósito. Como era esperado, houve uma grande dificuldade em se produzir o compósito. A dificuldade encontrada foi o fato do substrato, ao qual o nanocompósito era depositado, ser condutor (alumínio). Devido a isto, caso as fitas entrassem em contato com o alumínio, o que seria muito provável que ocorresse, a condutividade medida seria a do alumínio por seria muito menor que a das nanofitas. Além disto, existe uma limitação quanto à área revestida, que era muito maior que a maioria dos nanocompósitos encontrados na literatura. Como o processo de síntese do ITO é demorado, optou-se por diminuir o tamanho da placa de alumínio utilizada, para que se pudesse aproveitar melhor cada porção de ITO sintetizada. Com isto, chegou-se as dimensões da placa de alumínio de 100 mm de comprimento, 40 mm de largura e espessura de 2 mm, sendo que a área revestida deveria ser de 50 mm por 40 mm, conforme mostrado na figura 8 pela área cinza. Apesar desta área ser pequena para aplicações em engenharia, ela é muito maior do que

o filme proposto por Arlindo et al, fazendo com que fossem necessários alguns ajustes no método de criação do filme.

Figura 8 – Placa de alumínio utilizada.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Para verificar se o contato do alumínio com as nanofitas ocorreria, foi realizado um teste revestindo-se a placa diretamente com o compósito, no entanto, como esperado foi comprovado que ocorre o contato. Devido a este fato, não foi possível a utilização do método proposto por Arlindo (2012), no qual as nanofitas eram colocadas junto com o PMMA dissolvido em THF (tetrahidrofurano), misturado em um agitador ultrassônico e depois aplicado sobre a superfície desejada. Para resolver este problema, propôs-se adicionar uma camada de PMMA puro para isolar o alumínio do nanocompósito. No entanto, este método se mostrou pouco eficaz, pois o THF presente na mistura passava a dissolver o PMMA da camada inferior, fazendo com que a proporção de PMMA por grama de ITO aumentasse consideravelmente e, consequentemente, as nanofitas ficaram muito distante uma das outras, fazendo com que o caminho condutivo não se formasse.

Examinando-se uma amostra do filme produzido por este método, verificou-se que o ITO estava efetivamente inserido na matriz de PMMA, no entanto, como a quantidade de PMMA estava elevada, o que se encontrou neste caso foram “Ilhas” de ITO, ou seja, o ITO estava encapsulado pelo PMMA, isolando estas ilhas umas das outras.

Para se contornar estes fatos, propôs-se um novo método de produção do nanocompósito. Analisando-se as falhas obtidas com o método anterior, observou-se que a principal causa dos problemas era o fato de que o ITO é mais denso do que o PMMA, fazendo com que inevitavelmente algumas fitas acabassem se depositando no fundo, criando um contato com o

alumínio. Além disso, utilizar mais PMMA para tentar isolar a camada inferior do filme também se mostrou ineficaz. A alternativa proposta foi tentar garantir que as nanofitas ficassem concentradas somente na superfície externa do filme. Para isto, propôs-se o seguinte procedimento:

1) Determinar a área a ser revestida e a espessura do filme;
2) Calcular o volume de PMMA necessário para aquela área;
3) Calcular o volume de PMMA necessário para a área total da placa, determinar a massa de PMMA necessária para aquele volume (densidade do PMMA = 1,188g/cm^3);
4) Revestir a placa inteira com PMMA e esperar sua secagem;
5) Calcular a massa de ITO necessária para obter a porcentagem em massa desejada;
6) Separar a massa de ITO;
7) Dissolver o ITO no solvente (THF), em uma proporção de 1:7,1 (valor determinado empiricamente);
8) Utilizar o misturador ultrassônico (Desruptor de Célular Ultra-Sônico da UNIQUE, figura 9) para melhorar a dispersão do ITO (40 segundos);
9) Despejar a mistura sobre a placa, delimitando a área determinada no item 1.

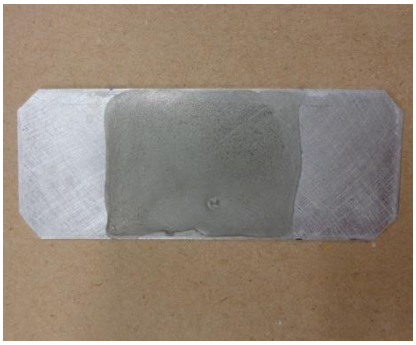
Figura 9 – Desruptor de Célula utilizado para dispersar o ITO.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A figura 10 mostra uma das placas obtidas pelo processo descrito.

Figura 10 – Placa de alumínio revestido com o nanocompósito.



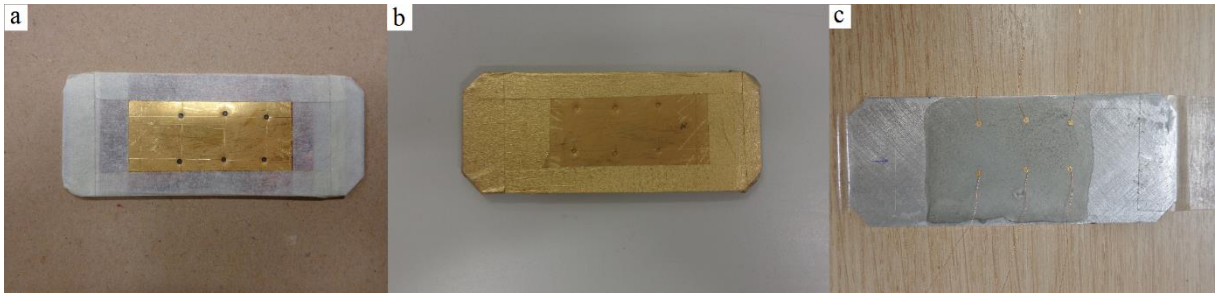
Fonte: Elaboração do próprio autor

Realizando-se testes com um multímetro verificou-se que ao longo da placa existem locais com resistências elétricas variando de 5kΩ a 100kΩ. Os valores ideais para os valores da resistência seriam na faixa dos quilo ohms, já que com estes valores sabe-se que a quantidade de ITO por área está um pouco acima do limite de percolação. Isto significa que, com estes valores a quantidade de nervos no compósito não seria nem tão alta a ponto de um dano não variar significativamente a resistência elétrica, nem tão baixa a ponto de não haver nervos suficientes para monitorar toda a área revestida.

4.4 Caracterização do Filme/Sensor

Depois de prontas as placas com os revestimentos de nanocompósitos, segue-se para a fase de colocação de eletrodos de ouro utilizando a técnica de *sputtering*, no qual é depositado uma camada de ouro de aproximadamente 400nm de espessura sobre o compósito. O formato dos eletrodos é delimitado por uma "máscara" que formam os pontos amarelos presentes na figura 8. A figura 11a mostra a placa com a máscara para a deposição dos eletrodos, a figura 11b mostra a placa após a deposição e a figura 11c mostra a placa após a remoção da máscara e já com os fios preparados para a "soldagem".

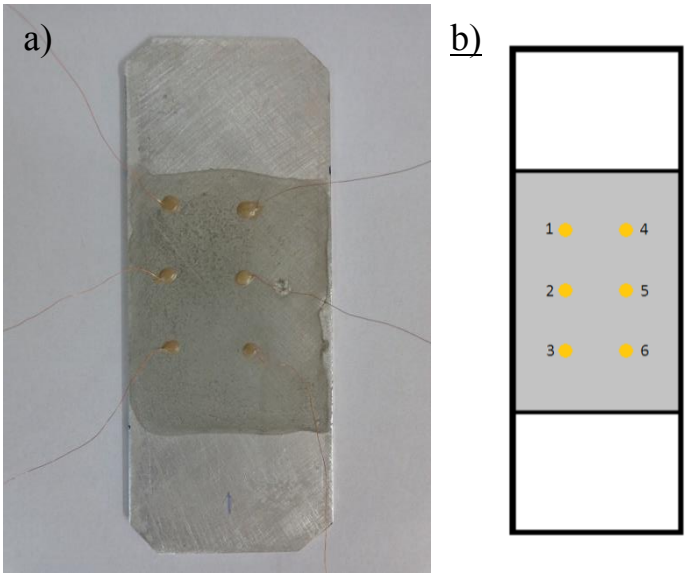
Figura 11 – a) Placa com a máscara. b) Máscara recoberta com ouro. c) Placa com os terminais e fios para a “soldagem”.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Sobre estes pontos são colados fios de cobre, que serão ligados ao sistema de medição de condutividade. A condutividade foi medida com o SMU (*Source Measure Unit*) “Keithley 236”. Para colar os fios aos eletrodos de ouro utiliza-se a solda líquida condutiva “Mh Condux – MY203”, produzida pela MH NANO. A figura 12 mostra a placa com os fios colados.

Figura 12 – Placa com os fios colados.



Fonte: Elaboração do próprio autor

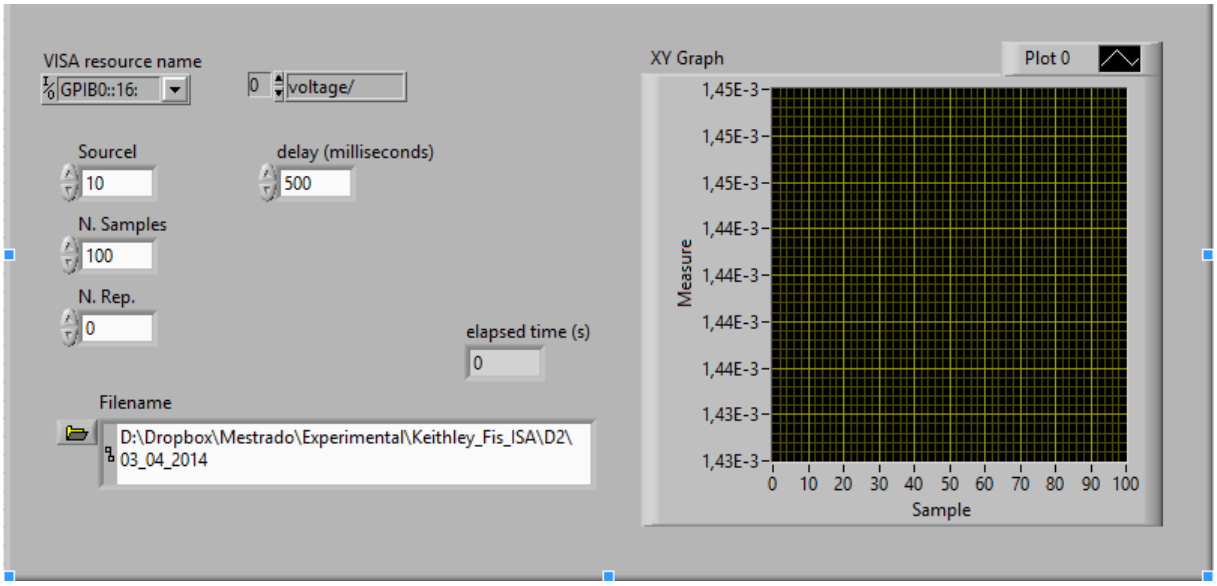
Os eletrodos de ouro são enumerados e as resistências são medidas entre cada par de terminais, sendo que os pares são denominados com a letra “r” de resistência seguidos por dois números de um a seis, com o primeiro representando o número do terminal a qual o cabo

positivo do multímetro está ligado, e o segundo número representando o número do terminal a qual o cabo negativo está ligado (Exemplo: r12 = resistência entre o terminal 1 e o terminal 2, com o cabo positivo em 1). A Figura 12b mostra a numeração das placas.

Os pares de terminais medidos foram: r12, r14, r15, r16, r23, r25, r26, r36, r42, r43, r45, r53 e r56 para a maior parte dos experimentos.

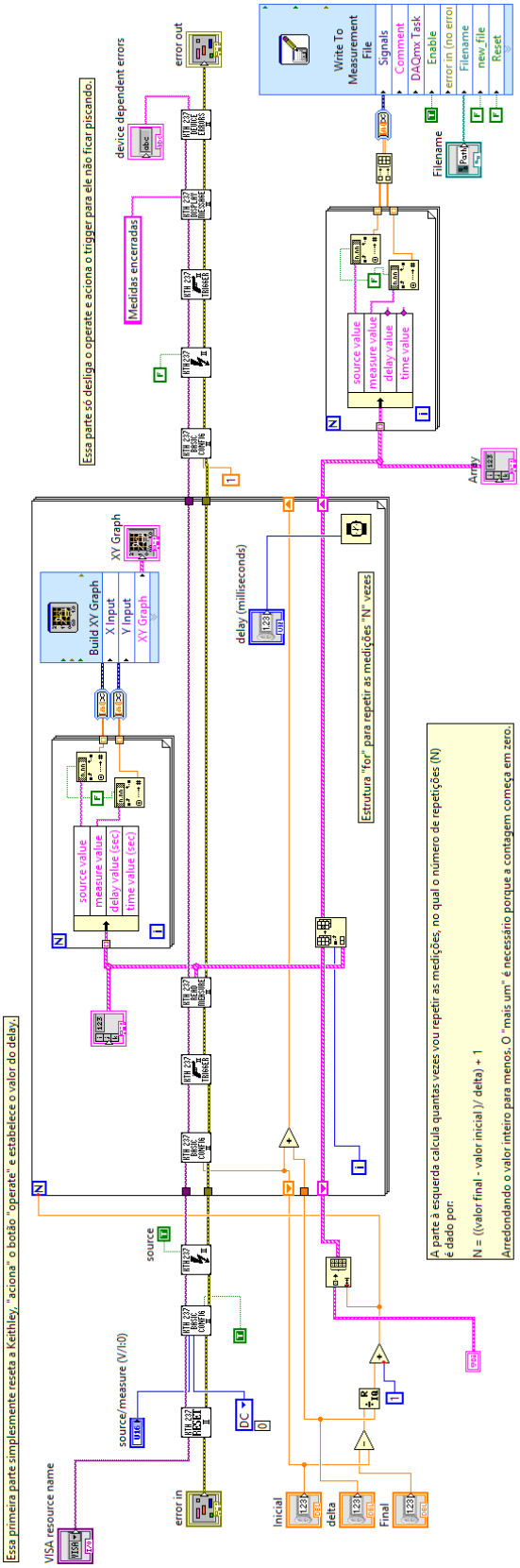
Quanto à aquisição dos dados foi desenvolvido um "VI" (*Virtual Instrument*), no LabView da National Instruments, utilizando drivers prontos providos pela própria National e modificados para adaptar ao GPIB da Agilent. O VI criado realiza uma quantidade determinada de medições da resistência entre os terminais da SMU, no qual pode-se escolher a quantidade de medições, o intervalo entre cada medição, se a fonte é de corrente ou de tensão e a amplitude da fonte aplicada. A figura 13 mostra a imagem do software de aquisição e a figura 14 mostra o diagrama de blocos da mesma.

Figura 13 – Interface gráfica do VI desenvolvido.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 14 – Diagrama de blocos do VI.



Fonte: Elaboração do próprio autor

É reservada à National Instruments os direitos autorais dos drivers utilizados como base para a programação do VI.

Para a caracterização dos sensores foram realizados três tipos de testes: ensaio de tração com medição simultânea da resposta do sensor, medições de resistência em ambiente controlado, com variações de temperatura e umidade, e medições de resistência antes e depois da aplicação de um dano sobre a estrutura.

Para a realização do teste com ensaio de tração, utilizou-se a máquina universal de ensaios modelo “WDW100EB” da Time Group Inc. A figura 15 mostra o equipamento utilizado.

Figura 15 – Máquina universal de ensaios

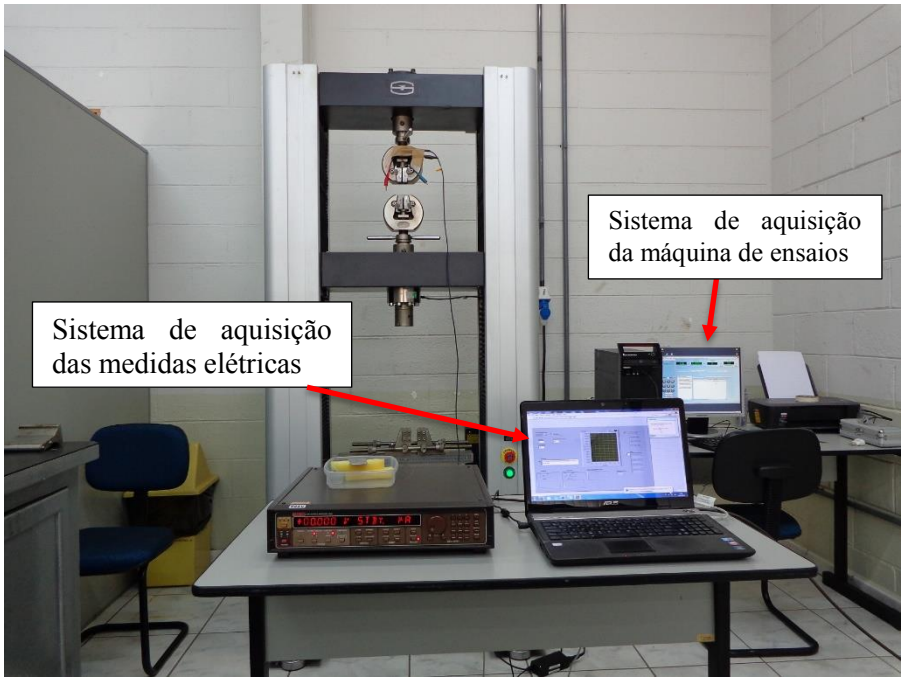


Fonte: Elaboração do próprio autor

Antes da realização dos testes de tração, realizou-se o ensaio de tração com placas de alumínio com a mesma dimensão das placas revestidas, com o intuito de se verificar o limite de escoamento da placa, pois caso este limite fosse atingido, o filme poderia ser danificado antes do desejado. Como o software de aquisição e controle do ensaio de tração era da própria empresa, não havia a possibilidade de se integrar o sistema de “gatilho” ou “trigger” do

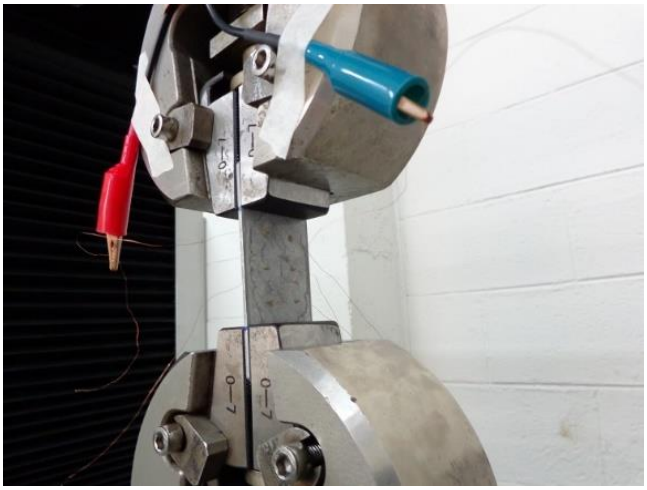
sistema de medição de resistência com o sistema do ensaio, portanto as medições foram sincronizadas pelo cronômetro, presente no software de aquisição de ambos os instrumentos. Com esta montagem foram realizados dez ciclos de carregamento, deslocando o cabeçote da máquina de zero a 2mm, a uma taxa de 1mm/min. Estes valores foram escolhidos observando-se os resultados dos testes iniciais utilizando as placas de alumínio sem revestimento de forma que a placa sob teste não atingisse o limite de escoamento, pois isto poderia causar alterações permanentes no sensor e o intuito neste experimento era verificar a influência da tensão mecânica sobre o sensor e não a influência da deformação plástica. Depois de cada medição a máquina era descarregada e esperava-se até que a carga fosse totalmente aliviada sobre a placa para que o processo pudesse ser repetido sem influência do teste anterior. Para ter certeza de que não haveria deformação permanente, depois de cada ensaio o comprimento da placa era medido e comparado com o comprimento medido anteriormente. Dessa forma foi possível verificar a influência da tensão sobre o as medições do sensor, sem a interferência de deformações permanentes. O teste da influência da deformação plástica seria realizado uma única vez após realizadas todas as medições referentes à tensão mecânica, pois após a deformação plástica a amostra é inutilizada. A figura 16 mostra a montagem deste experimento e a figura 17 mostra o detalhe da garra.

Figura 16 – Montagem do experimento com o ensaio de tração.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 17 – Detalhe da fixação da placa.

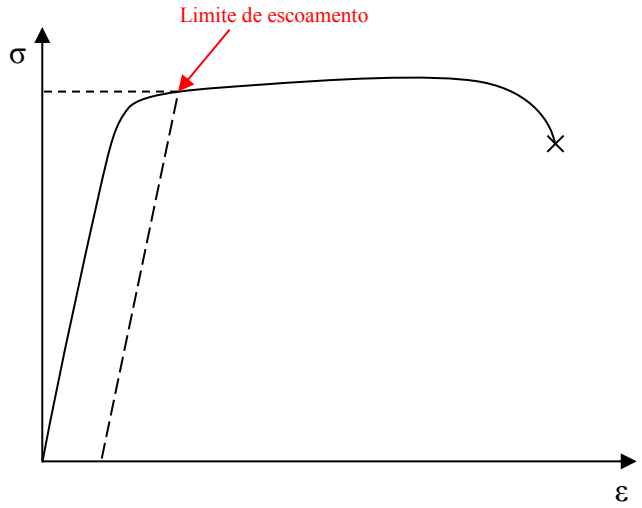


Fonte: Elaboração do próprio autor

Para se verificar a influência da deformação plástica do alumínio sobre a medições do sensor, foi realizado um único teste no qual se aplicava um deslocamento maior que 2mm até que o gráfico da tensão pela deformação apresentasse características de deformação plástica. O alumínio é um material dúctil, que não apresenta patamar de escoamento definido (figura 18), portanto quando o gráfico apresentar uma aparência semelhante à figura 18, e não uma reta, seria sinal de que o material estaria começando a deformar plasticamente.

Como não seria possível trocar os terminais medidos durante o ensaio de tração (para medir todos os caminhos citados anteriormente), optou-se por medir somente a resistência entre 1 e 3 por ser o caminho que abrangeria todo o comprimento da placa.

Figura 18 – Comportamento típico do gráfico tensão/deformação do alumínio.



Fonte: Elaboração do próprio autor

O segundo teste realizado foi o teste da temperatura. Para isso utilizou-se uma câmara ambiental modelo “SM-8-8200” da Thermotron (figura 19). O teste consiste em realizar medições de temperatura repetidas vezes durante um período de tempo, com a temperatura e a humidade controlada. Este teste tem como função verificar a aplicabilidade deste sensor em situações reais de voo, já que as aeronaves comerciais trabalham com variações ambientais que podem variar de -50 a 40ºC dependendo do país e da altitude. O controle da umidade se deve ao fato de que inicialmente previu-se que as variações de umidade poderiam influenciar mais as medições do que a variação de temperatura.

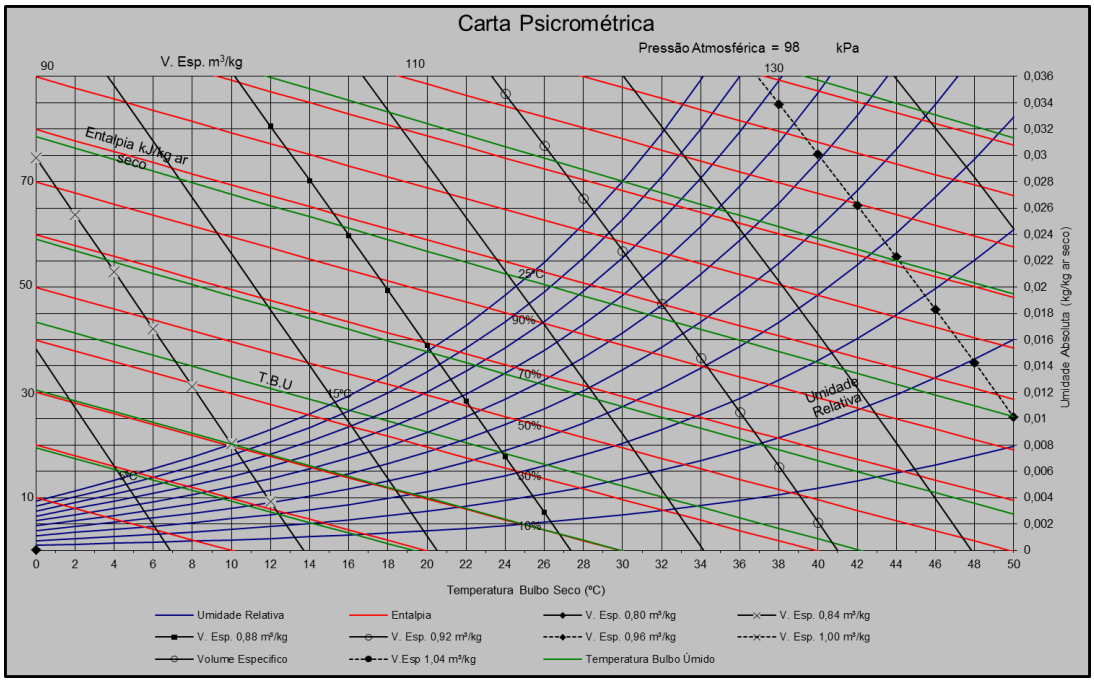
Figura 19 – Câmara ambiental.



Fonte: Elaboração do próprio autor

O procedimento para este teste consiste em posicionar a placa dentro da câmara, em configuração livre/livre para que não haja interferência da própria câmara sobre as medidas elétricas, de forma que não haja fluxo direto de ar quente, frio ou úmido sobre o filme. Realiza-se então três conjuntos de medições, no qual o primeiro consiste em realizar medições com a umidade fixa, variando-se a temperatura de 10 a 50 °C, em intervalos de dez em dez graus, realizando duzentas medições de resistência a uma taxa de uma medição por segundo, com intervalos de trinta minutos após atingir cada temperatura (intervalo de acomodação da temperatura dentro da câmara) e mantendo a umidade a 70%. O mesmo procedimento foi realizado no segundo conjunto de medições, variando a umidade de 20 a 100%, em intervalos de dez em dez por cento, fixando a temperatura em 50ºC. Nos dois primeiros conjuntos de testes se utilizou a carta psicrométrica referente à pressão atmosférica de Ilha Solteira (apróx. 98 kPa). A carta psicrométrica utilizada pode ser visualizada na figura 20.

Figura 20 – Carta Psicrométrica para a pressão atmosférica de Ilha Solteira.



FONTE: (DIAS; MACHADO; KOURY, 2005)

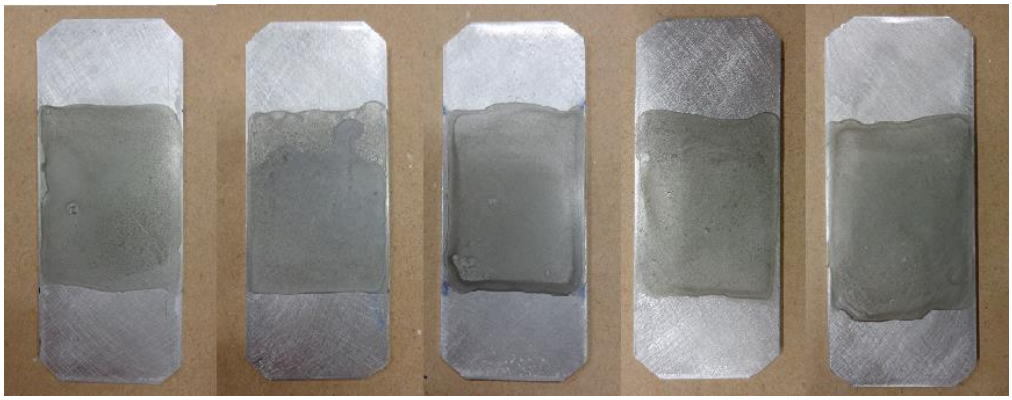
Como pode ser visto na carta, para manter a umidade constante devem-se seguir as linhas em azul, no entanto para valores negativos, todas as linhas de umidade relativa convergem para um valor muito baixo, portanto para este experimento optou-se por manter a umidade relativa constante e igual a 70%.

Por fim realizou-se o teste de detecção e localização do dano, aplicando-se um dano à placa e verificando a variação da medição antes e depois do dano. Para simular o dano, foram inseridos cortes entre os pontos de medição, de forma a se tentar identificar somente pelas variações de resistência a ocorrência do dano e a posição dele. Os danos foram criados em diversas posições diferentes, com dimensões diferentes, para se verificar a sensibilidade do sensor ao dano.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram obtidas 6 placas, sendo elas denominadas D1, D2, até D5. A figura 21 mostra algumas das placas obtidas.

Figura 21 – Algumas das placas obtidas.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Todas as placas D foram testadas inicialmente com um multímetro para verificar as suas condutividades. Todas elas indicaram algum nível de condutividade.

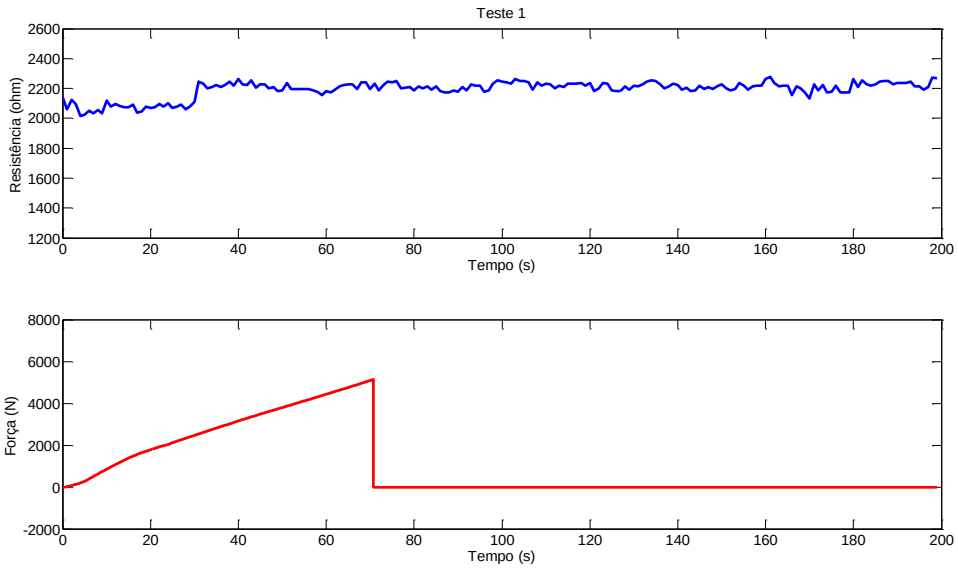
5.1 Influência da Tensão e da Deformação

Seguiu-se então com a realização dos testes com o ensaio de tração. Nesta fase foram realizados dois ensaios de tração, utilizando as placas D1 e D2. Para cada ensaio foram realizadas dez repetições, como descrito no procedimento experimental.

5.1.1 Placa D1

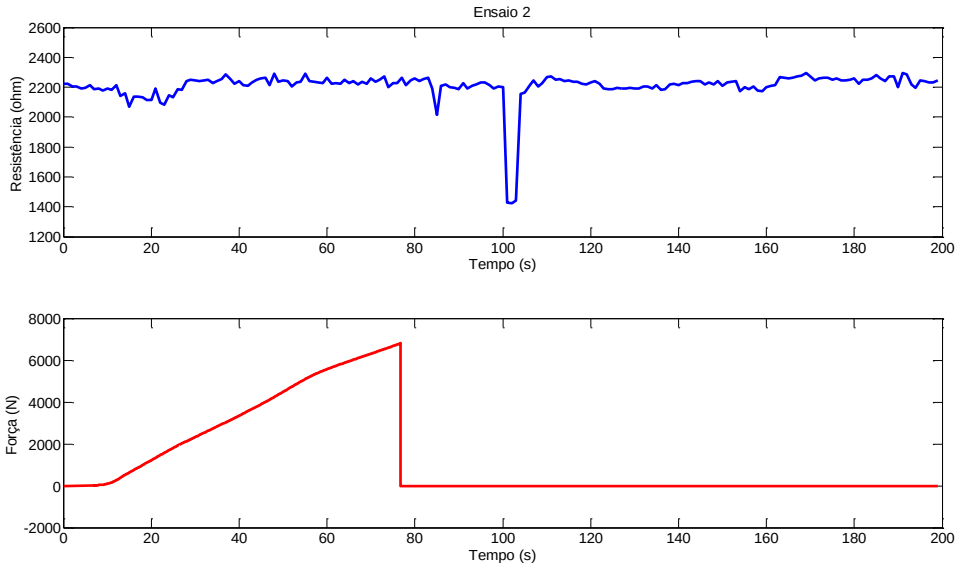
As figura 22 à 31 mostram os gráficos obtidos para a placa D1, sendo que o gráfico em azul (superior) mostra os valores medidos de resistência e o gráfico vermelho (inferior) mostra o resultado da força registrado pela máquina de ensaio de tração.

Figura 22 – Placa D1, Ensaio de tração nº 1.



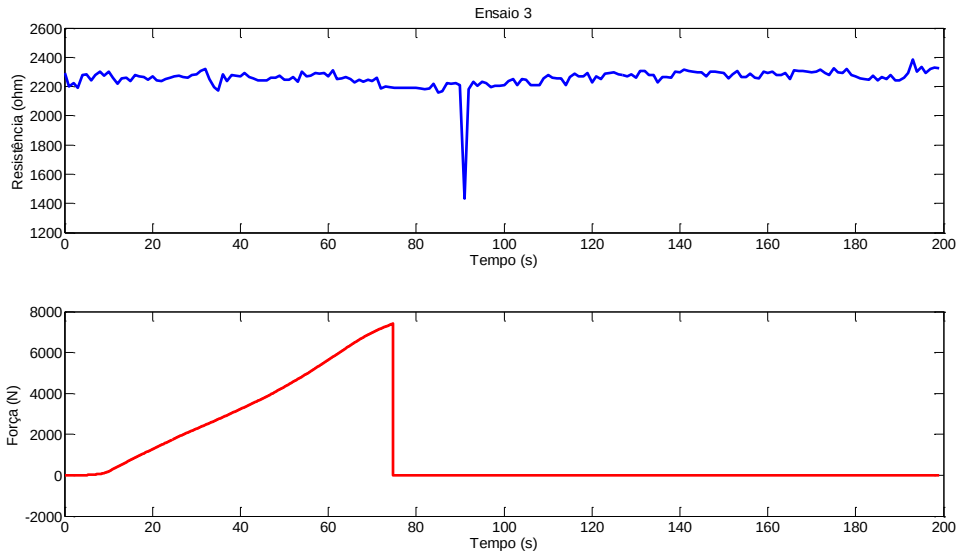
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 23 – Placa D1, Ensaio n° 2.



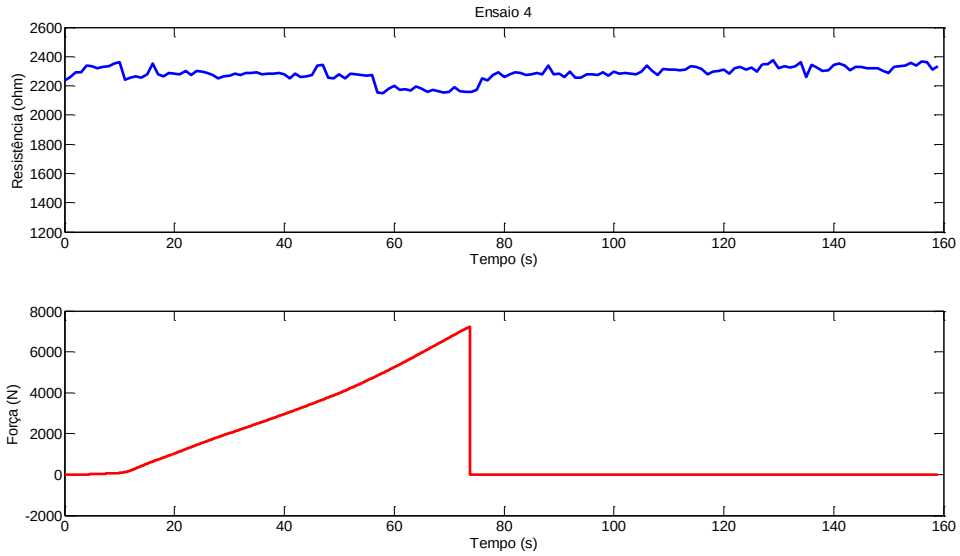
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 24 – Placa D1, Ensaio nº 3.



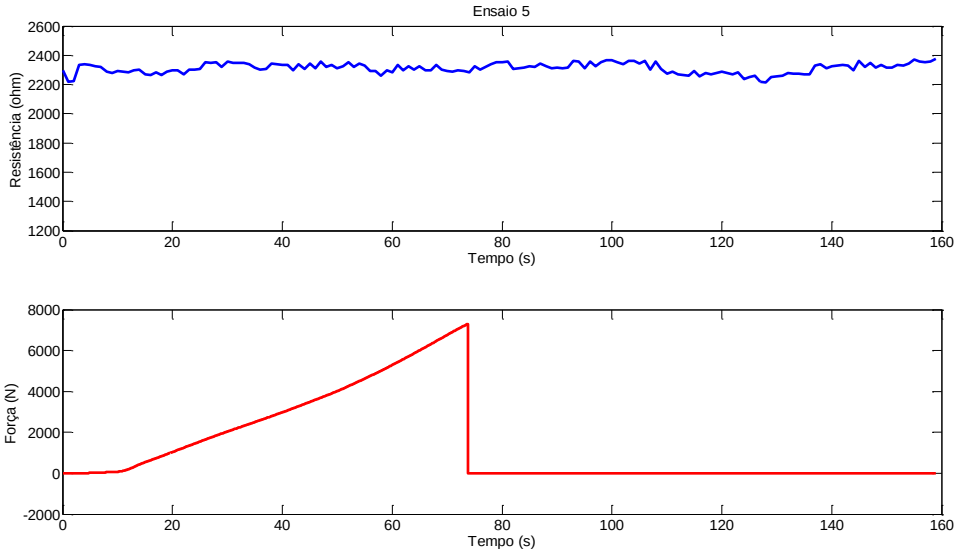
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 25 – Placa D1, Ensaio nº 4.



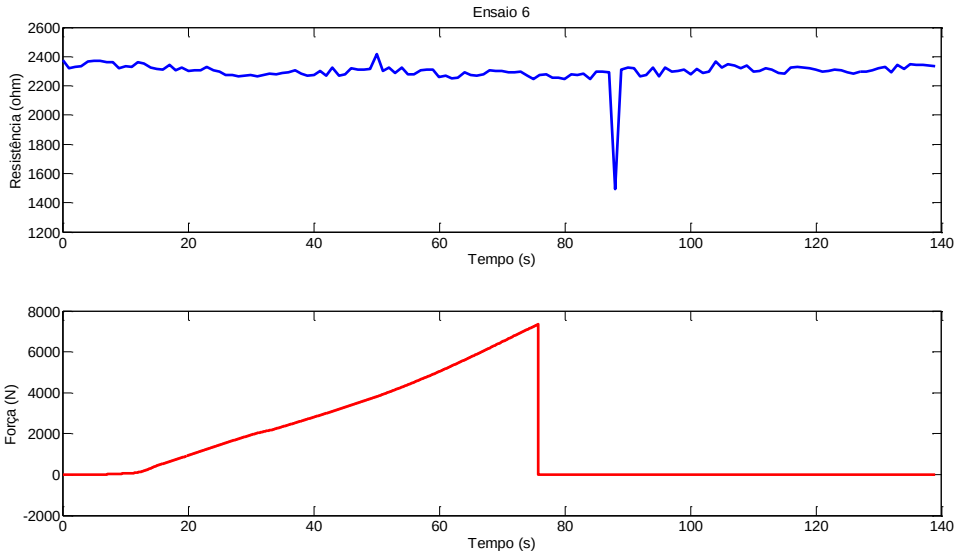
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 26 – Placa D1, Ensaio nº 5.



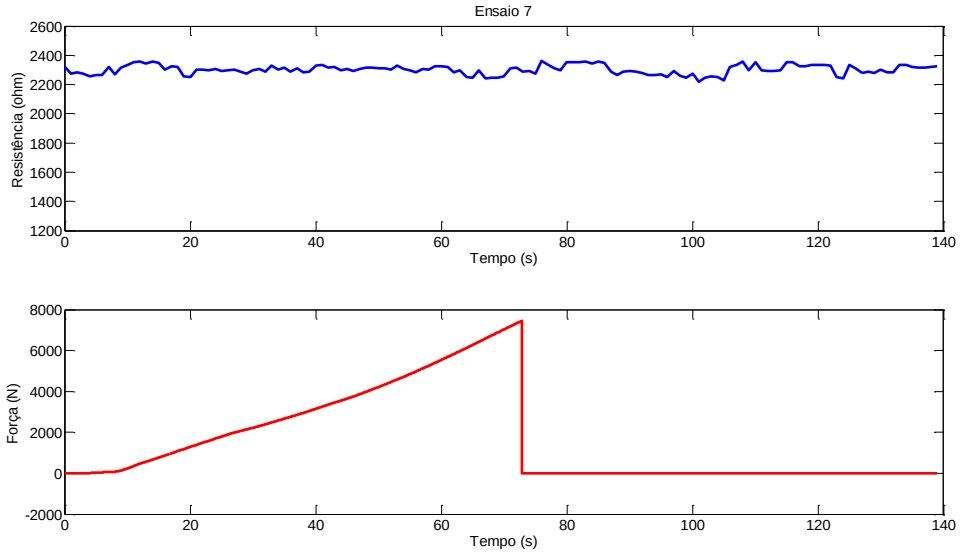
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 27 – Placa D1, Ensaio nº 6.



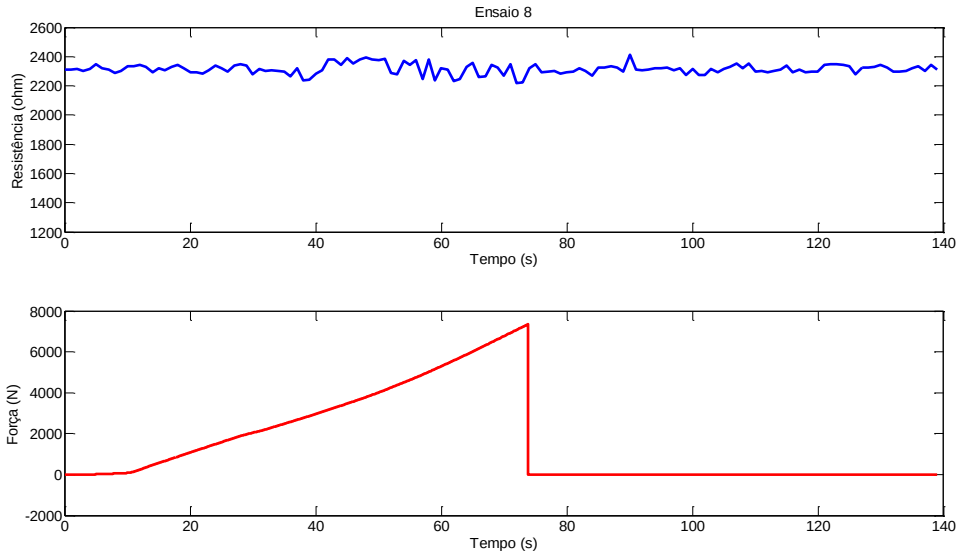
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 28 – Placa D1, Ensaio nº 7.



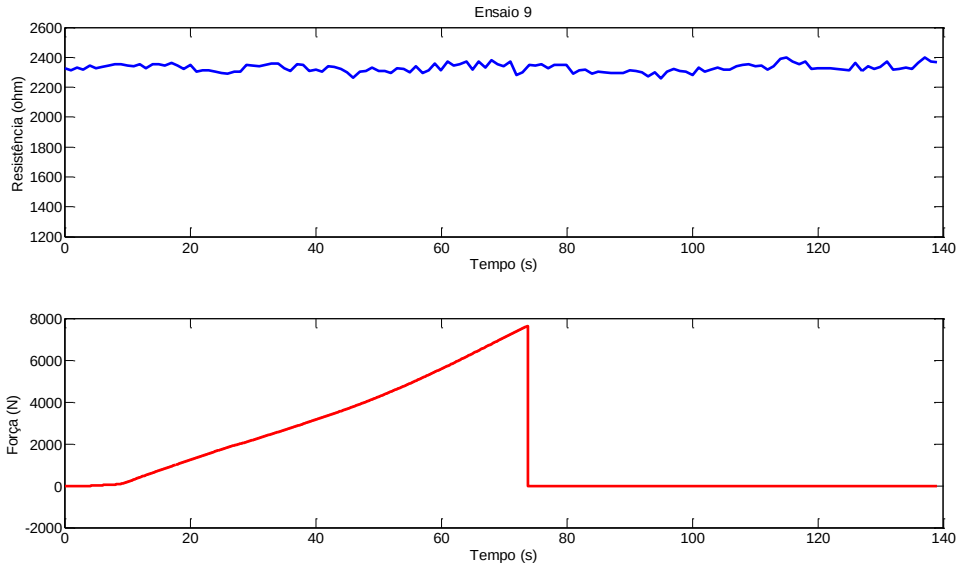
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 29 – Placa D1, Ensaio nº 8.



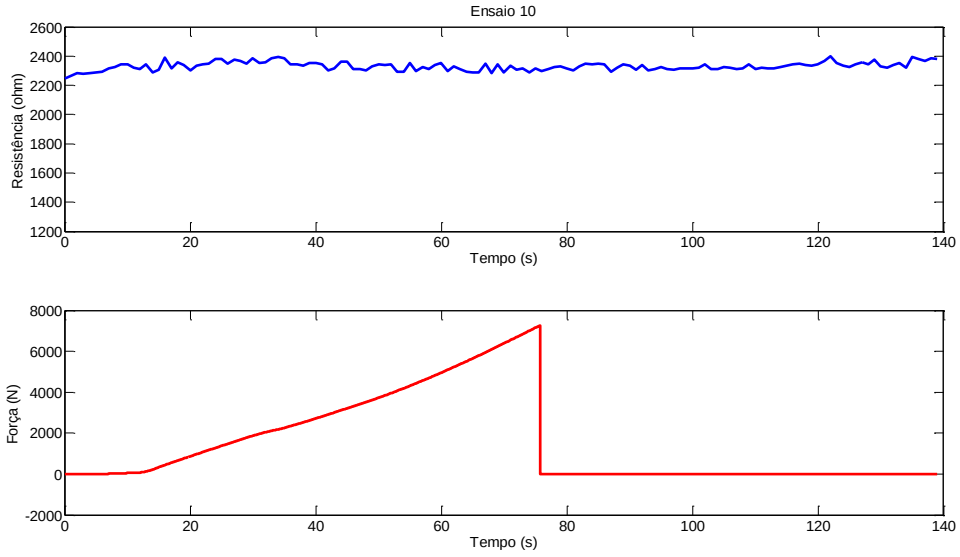
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 30 – Placa D1, Ensaio nº 9.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 31 – Placa D1, Ensaio nº 10.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A tabela 2 mostra os valores médios da resistência durante as medições e os valores do desvio padrão.

Tabela 2 – Valores médios e desvios padrões da primeira placa.

Teste	Valor Médio (Ω)	Desvio Padrão
1	2,19E+03	57,15
2	2,21E+03	104,45
3	2,26E+03	69,83
4	2,28E+03	51,24
5	2,31E+03	34,48
6	2,30E+03	74,91
7	2,30E+03	31,99
8	2,31E+03	35,09
9	2,33E+03	26,51
10	2,33E+03	28,74

Fonte: Elaboração do próprio autor

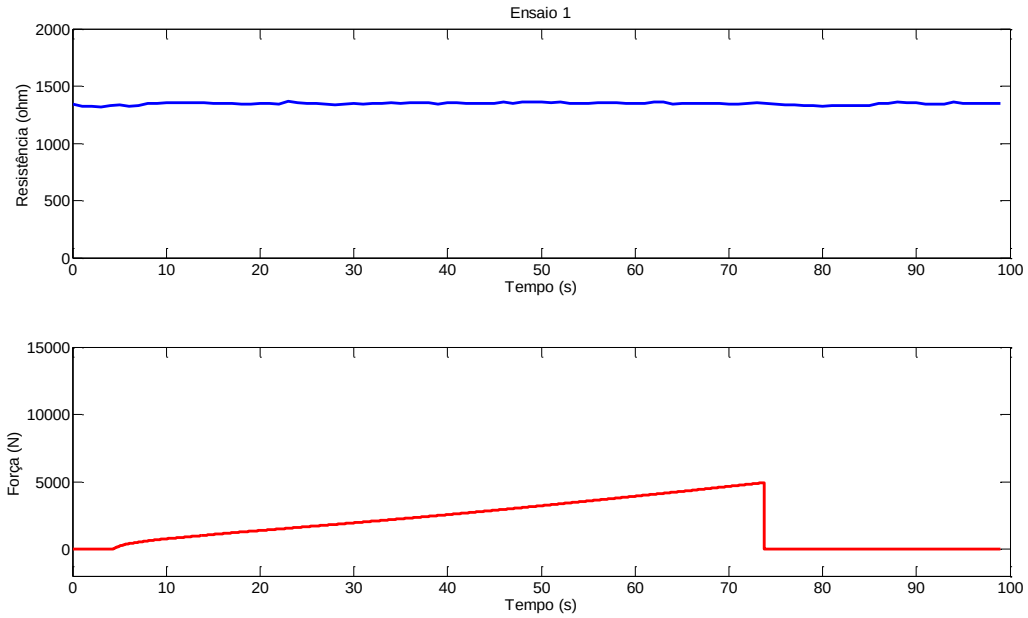
Analisando-se somente os valores da média, nota-se que não houve uma variação muito grande comparando-se todas as medidas. Do ponto de vista do desvio padrão observa-se alguns valores altos, no entanto estes valores devem-se principalmente a ruídos na medição, como pode ser observado por alguns pontos discrepantes nas figuras 23, 24 e 27. Sendo assim pode-se observar que não houve variações significativas nas medições da placa D1 quando submetida a esforço de tração. É importante notar que não houve deformação plástica, já que o deslocamento utilizado foi pequeno e testes iniciais mostraram que um deslocamento de 2 mm não seria o suficiente para causar deformação permanente na placa. Além disto, os gráficos de tensão/deformação apresentam um comportamento linear (como o deslocamento do cabeçote da máquina de ensaios era constante e considerando uma área de secção transversal da placa também constante, pode-se dizer que o comportamento do gráfico tensão vs. deformação seria o mesmo do gráfico força vs. tempo).

Seguiu-se então para a realização do ensaio com a segunda placa, D2.

5.1.2 Placa D2

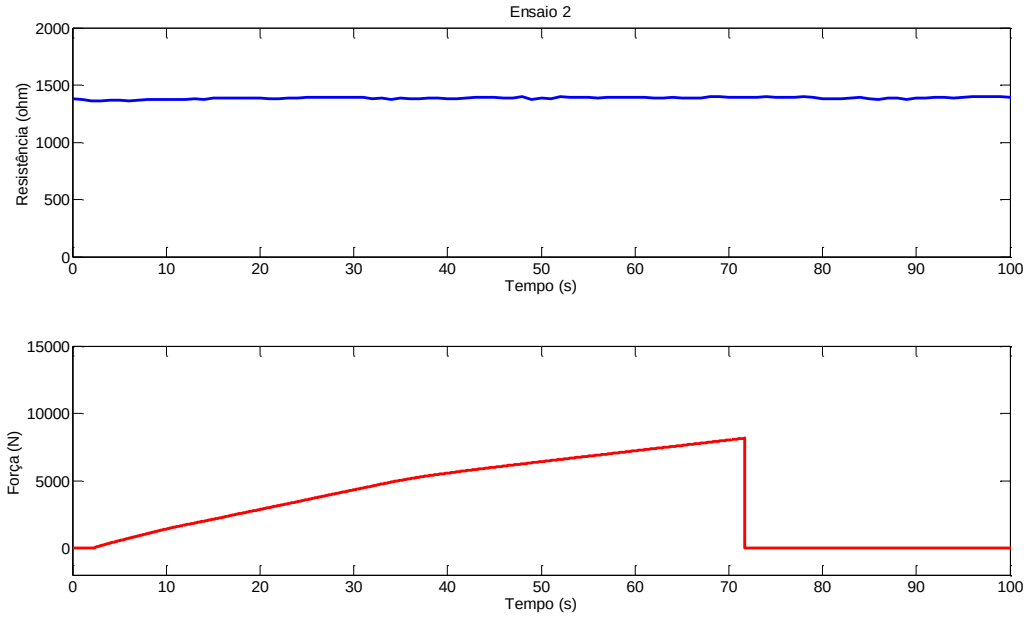
As figura 32 a 37 mostram os gráficos obtidos para o ensaio com a placa D2.

Figura 32 – Placa D2, Ensaio de tração nº 1.



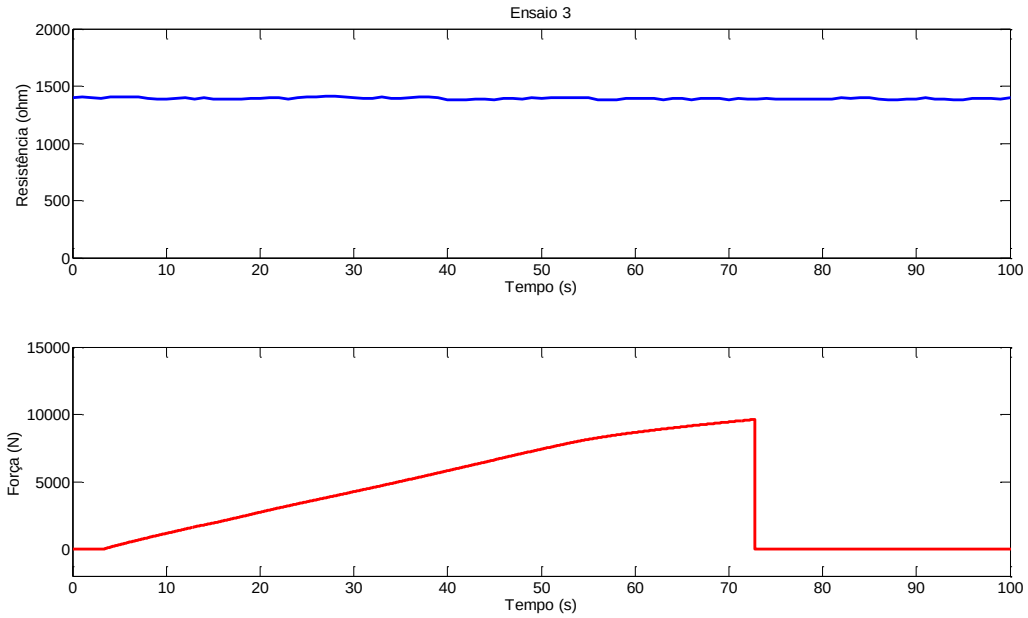
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 33 – Placa D2, Ensaio n° 2.



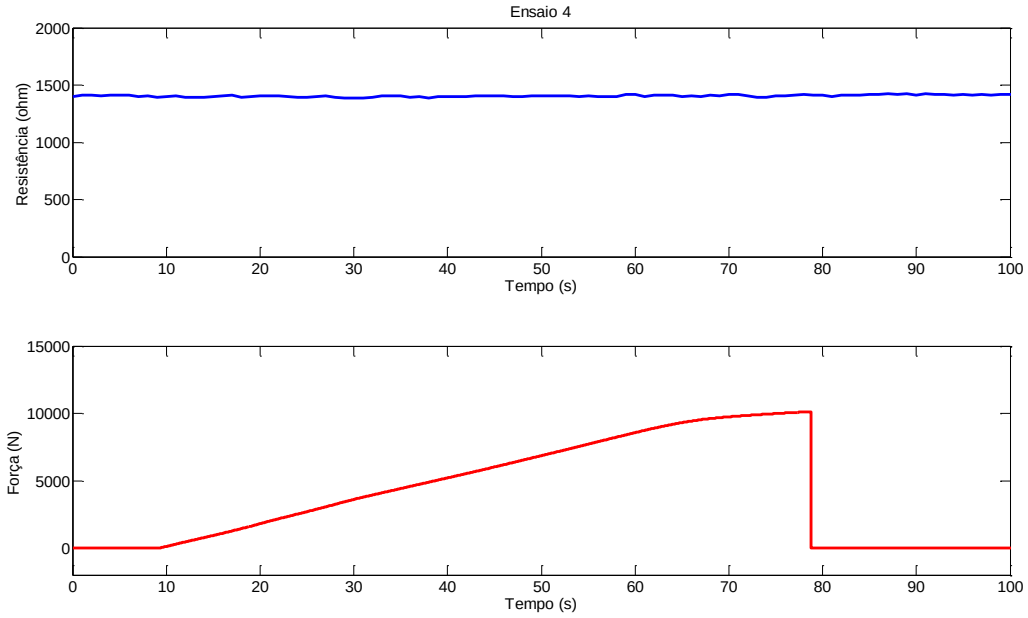
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 34 – Placa D2, Ensaio nº 3.



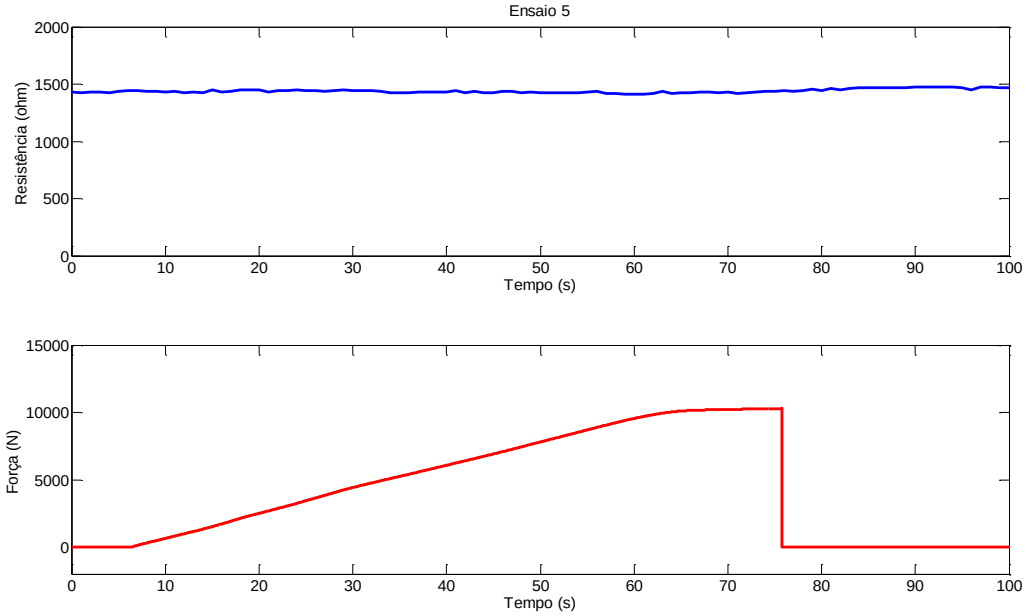
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 35 – Placa D2, Ensaio nº 4.



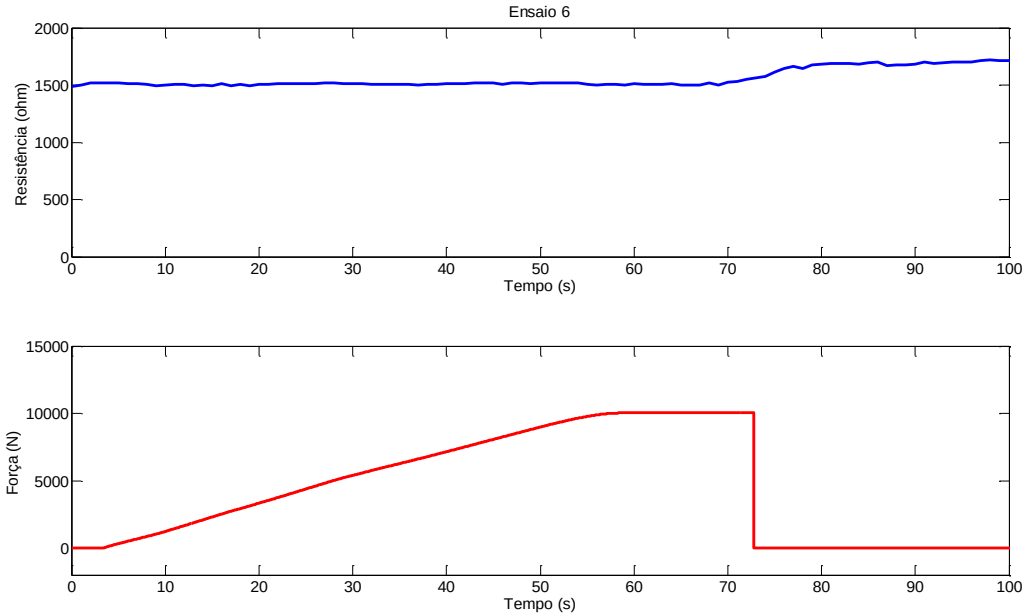
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 36 – Placa D2, Ensaio nº 5.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 37 – Placa D2, Ensaio nº 6.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A tabela 3 mostra os valores médios da resistência durante as medições e os valores do desvio padrão.

Tabela 3 – Valores médios e desvios padrões da segunda placa.

Teste	Valor Médio (Ω)	Desvio Padrão (Ω)
1	1,35E+03	9,95
2	1,39E+03	9,01
3	1,40E+03	9,26
4	1,41E+03	13,27
5	1,45E+03	24,78
6	1,61E+03	108,40

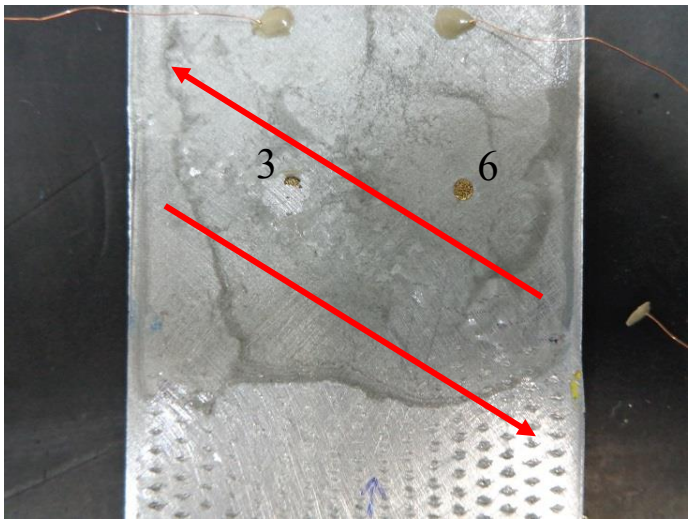
Fonte: Elaboração do próprio autor

Observando-se os gráficos da figura 35, figura 36 e figura 37 e os valores correspondentes da tabela 3 é possível notar que existe um aumento gradativo nos valores da resistência média e do desvio padrão nos testes 4, 5 e 6, além disto, os gráficos da força começam a se tornar mais parecido com o gráfico da figura 18, o que indica que a chapa entrou no regime plástico. Embora este fenômeno não fosse esperado, os resultados podem ser utilizados para estudar a influência da deformação plástica do alumínio nas medições elétricas.

O motivo de ocorrer a deformação plástica do alumínio pode ser atribuído ao fato de que não se observou a direção de laminação da chapa de alumínio antes que ela fosse cortada no tamanho indicado pela figura 8, desta forma é possível que algumas placas tenham sido cortadas de forma que seu comprimento maior ficasse na direção perpendicular a direção de laminação, o que resultaria em um limite de escoamento reduzido. Apesar de não se saber exatamente quais placas estejam paralelas e quais estejam perpendiculares à direção de laminação, é provável que a maioria esteja na direção paralela à laminação, já que todas as placas utilizadas para o pré-teste do ensaio apresentaram comportamentos similares umas das outras e elas foram cortadas em conjunto com as placas utilizadas para o recobrimento.

Com os resultados obtidos é possível observar que o sensor só apresenta alterações em suas medições quando a placa sofre uma deformação plástica e que com pequenas deformações permanentes o sensor se rompe, o que resultaria em um aumento elevado de resistência. Apesar do gráfico da figura 37 apresentar uma pequena alteração, o simples fato de abrir as garras para se retirar a placa fez com que o sensor se rompesse por completo, fazendo com que um dos terminais fosse desacoplado da placa. Este fato pode ser observado na figura 38.

Figura 38 – Placa D2 depois de ser retirada da máquina de ensaios.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Pela figura 38 é possível notar que apesar da região de maior deformação (entre as setas vermelhas) não atingir diretamente o terminal 6, houve o descolamento do fio neste ponto, lembrando que os fios foram fixados na máquina com uma folga, de forma que mesmo com a movimentação das garras, os fios não ficassem esticados de nenhuma forma (figura 17).

5.2 Influência da Temperatura e da Umidade

Os testes para verificar a influência da temperatura e a umidade foram realizados nas placas D3, D4 e D5. Com a placa D3 variou-se a temperatura e a umidade, com a placa D4 variou-se apenas a temperatura e com a placa D5 variou-se apenas a umidade.

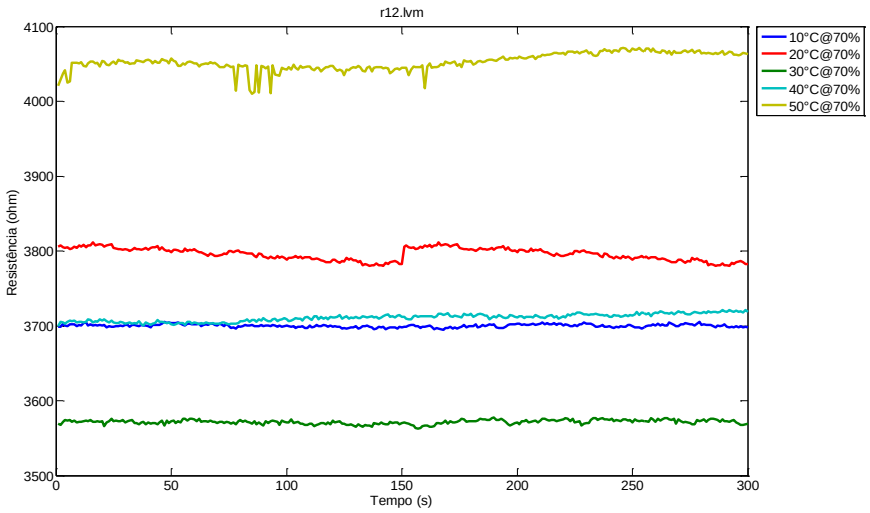
5.2.1 Placa D3

Inicialmente realizou-se os experimentos com a placa D3 variando a temperatura e fixando a humidade a 70%. Neste caso foram obtidas as medições mostradas nas figuras 39 a 51. A humidade foi fixada a 70%, pois esse era um valor mais próximo arredondado para cima no dia em que o experimento foi realizado. Esse valor poderia ser qualquer outro, no entanto, fixando-se um valor próximo à média de umidade relativa na cidade de Ilha Solteira (média anual de 65%, obtido pelo departamento de engenharia agronômica da FEIS)

garantiria que o tempo necessário para se atingir tal umidade fosse mínimo na maior parte dos experimentos.

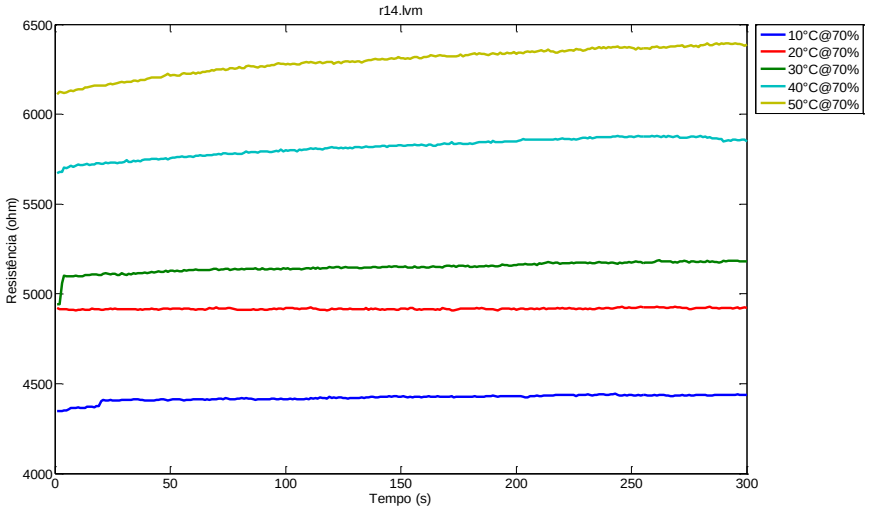
Não foram realizados testes com temperaturas abaixo de 10°C, tanto por ser praticamente impossível controlar a umidade a temperaturas tão baixas (olhando a carta psicrométrica da figura 20 se pode observar que nessas temperaturas as linhas de umidade são muito próximas umas das outras). A própria empresa que forneceu a câmara ambiental também recomenda a não se realizar este tipo de experimento, podendo causar sobrecarga à resistência do módulo de controle de umidade e consequentemente danificar o equipamento.

Figura 39 – Gráfico do comportamento da resistência r12 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



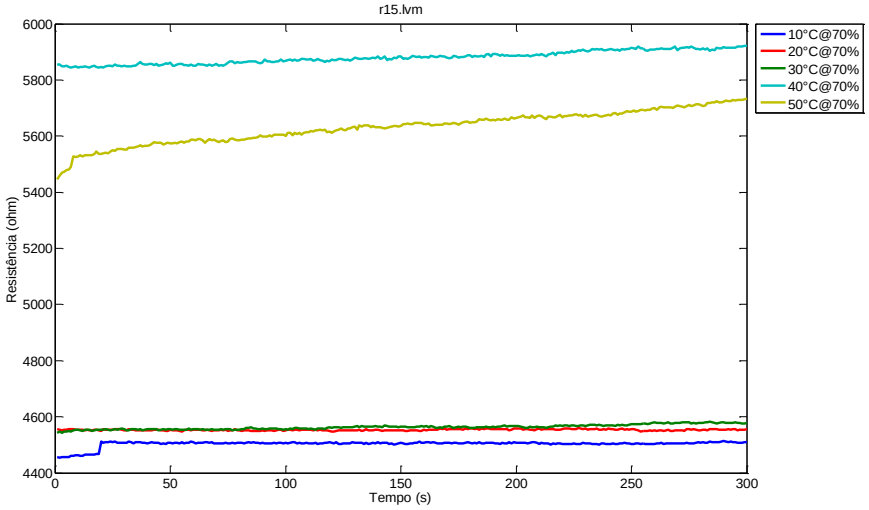
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 40 – Gráfico do comportamento da resistência r14 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



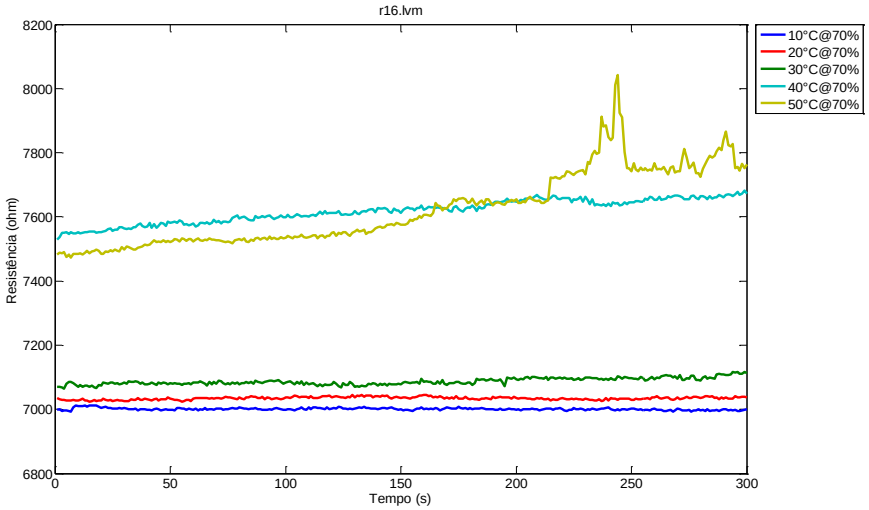
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 41 – Gráfico do comportamento da resistência r15 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



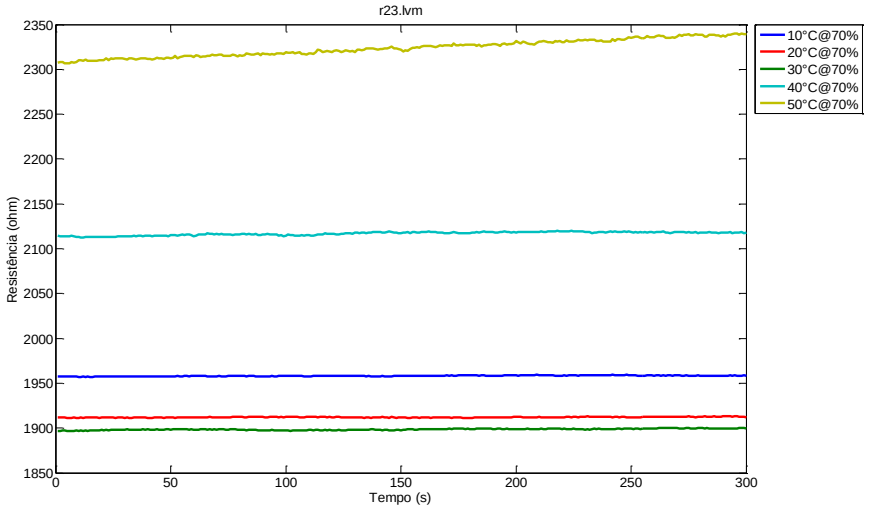
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 42 – Gráfico do comportamento da resistência r16 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



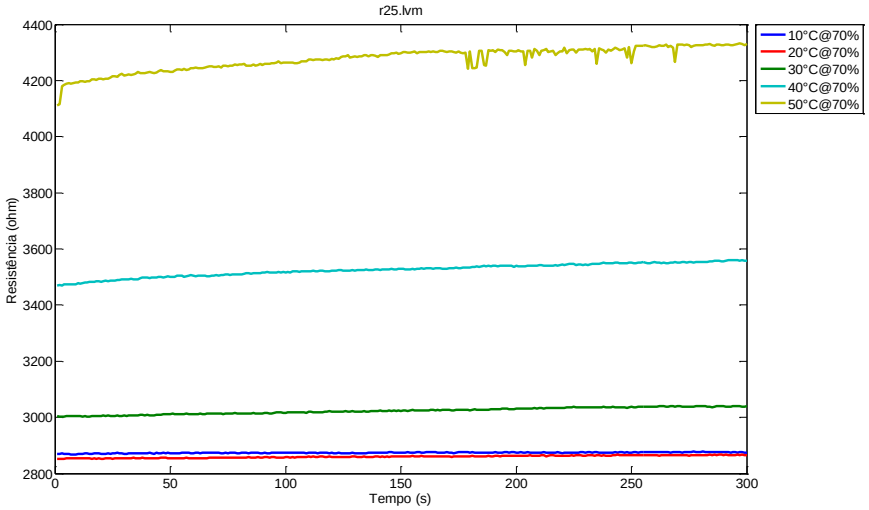
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 43 – Gráfico do comportamento da resistência r23 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



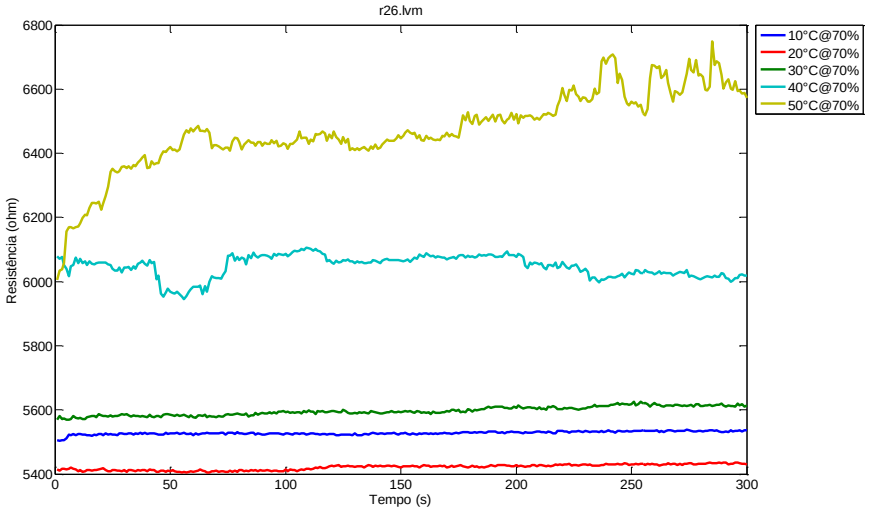
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 44 – Gráfico do comportamento da resistência r25 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



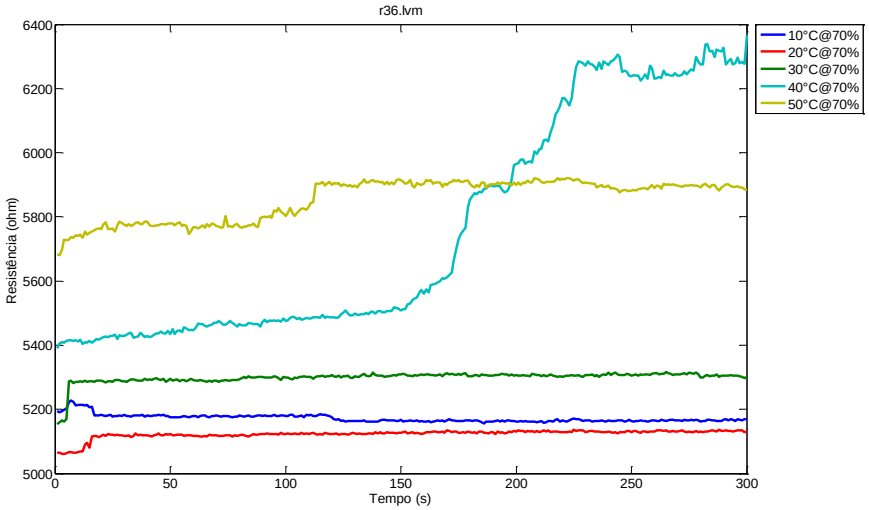
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 45 – Gráfico do comportamento da resistência r26 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



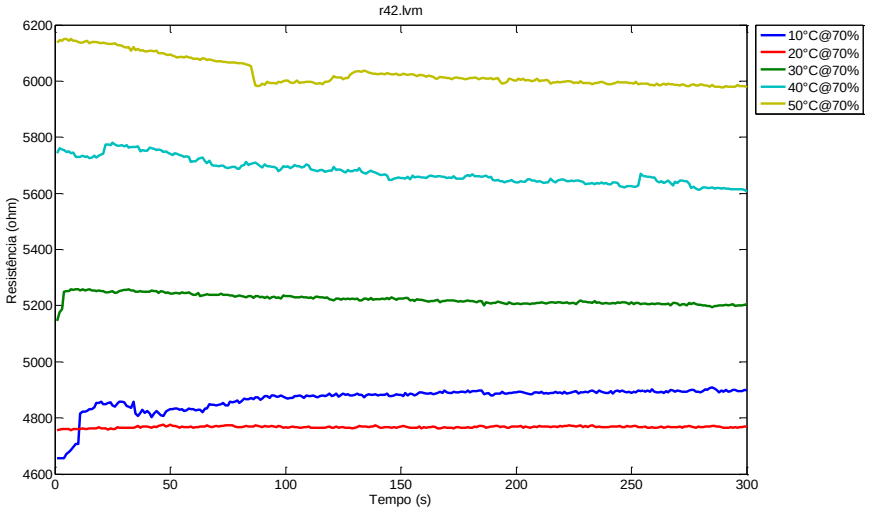
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 46 – Gráfico do comportamento da resistência r36 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



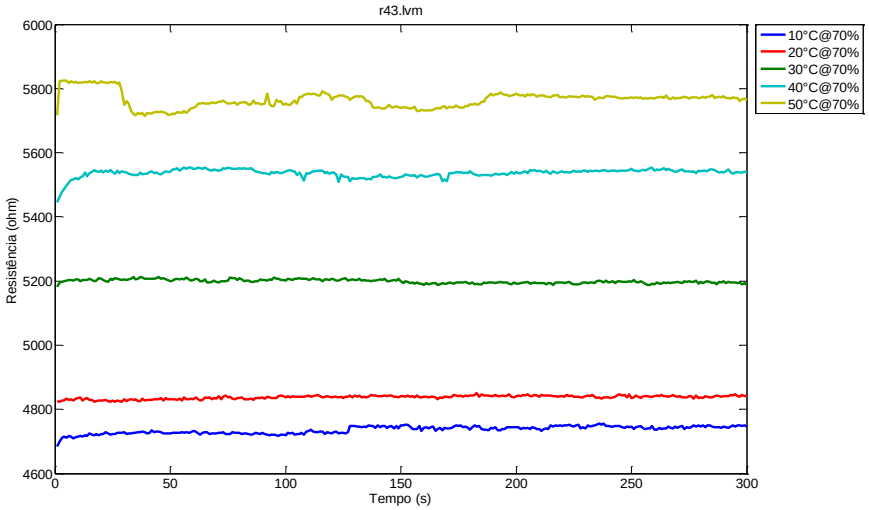
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 47 – Gráfico do comportamento da resistência r42 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



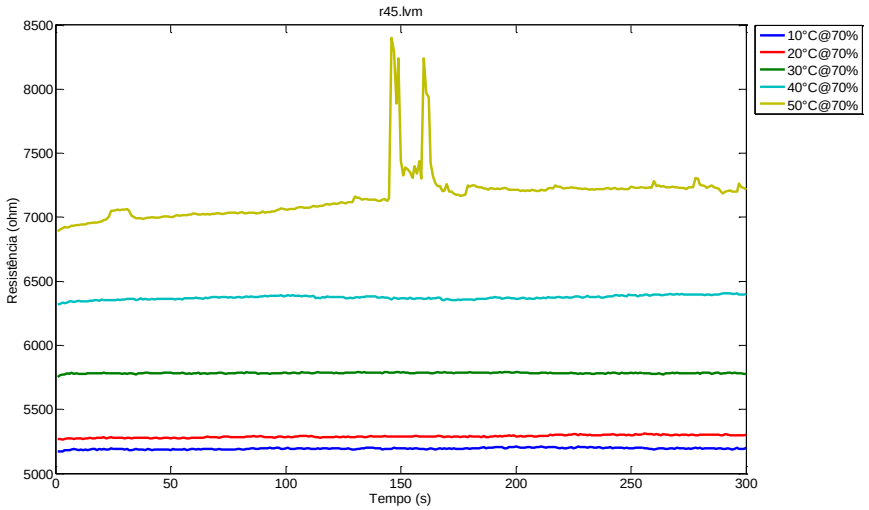
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 48 – Gráfico do comportamento da resistência r43 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



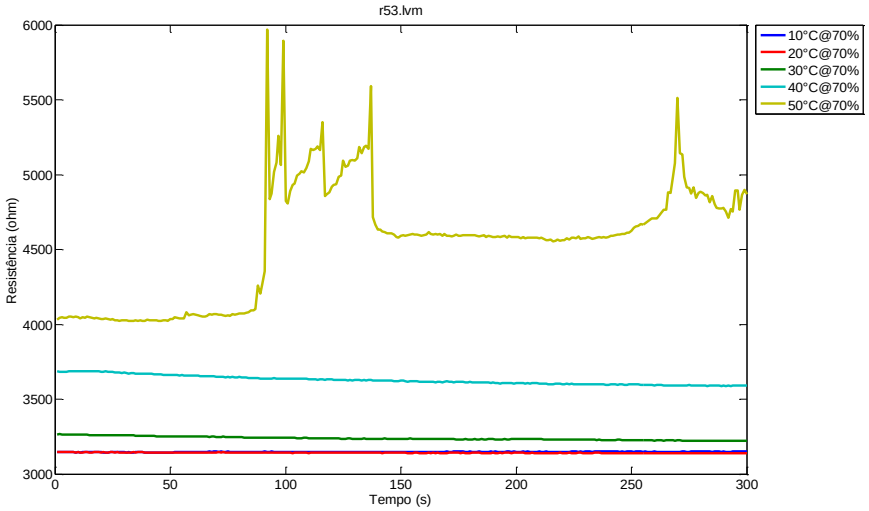
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 49 – Gráfico do comportamento da resistência r45 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



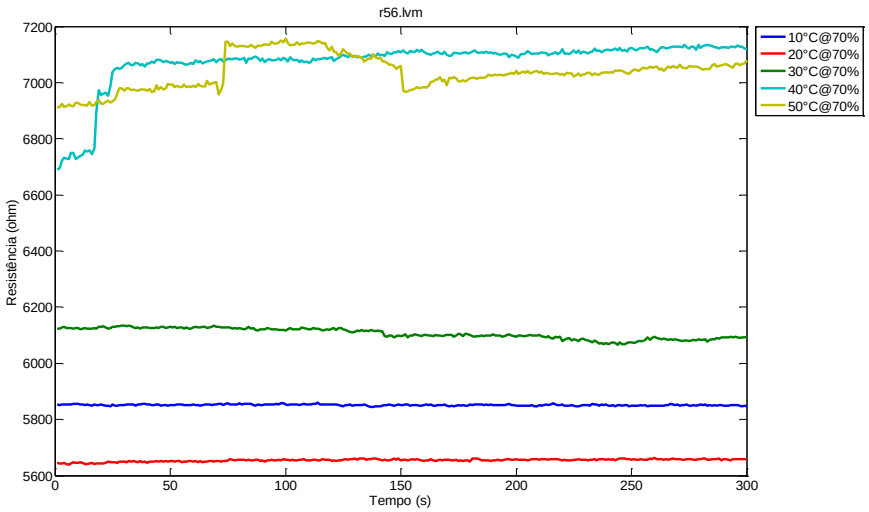
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 50 – Gráfico do comportamento da resistência r53 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 51 – Gráfico do comportamento da resistência r56 ao longo do tempo para cada uma das temperaturas testadas.



A tabela 4 mostra as resistências RMS obtidos para cada temperatura e a tabela 5 mostra a variação obtida de uma temperatura para outra.

Tabela 4 – Valores RMS de cada resistência para variação da temperatura mantendo a umidade em 70% para a placa D3.

	Valores RMS das resistências (Ohms)				
	10°C@70%	**20°C@70%**	**30°C@70%**	**40°C@70%**	**50°C@70%**
r12	3700,1	3795,8	3571,7	3710,9	4052,8
r14	4421,1	4917,1	5147,9	5815,5	6297,0
r15	4503,5	4553,3	4563,3	5880,1	5631,4
r16	7001,0	7034,5	7087,4	7617,9	7622,7
r23	1958,2	1912,1	1898,5	2116,9	2323,8
r25	2874,0	2860,1	3023,4	3525,4	4277,6
r26	5528,0	5421,1	5596,7	6047,7	6472,9
r36	5172,1	5123,2	5299,1	5768,9	5855,0
r42	4868,6	4767,5	5223,1	5677,1	6030,5
r43	4735,9	4837,7	5199,1	5536,8	5765,3
r45	5194,1	5289,1	5783,5	6373,7	7164,8
r53	3148,3	3141,9	3238,5	3627,1	4561,7
r56	5851,4	5654,7	6106,4	7075,0	7037,3

Fonte: Elaboração do próprio autor

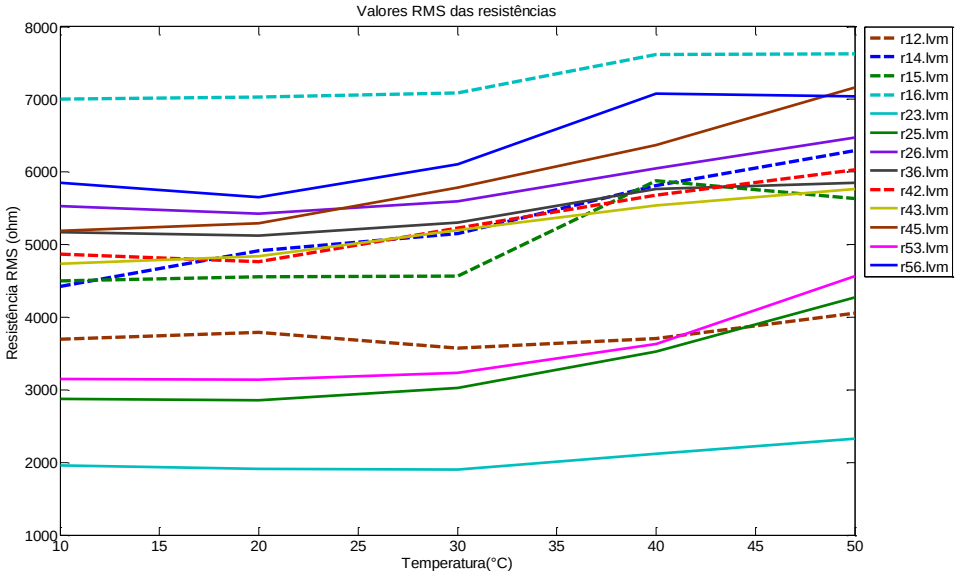
Tabela 5 – Comparações de resistências para variação da temperatura mantendo a umidade em 70% para a placa D3.

	10°C p/ 20°C	**10°C p/ 30°C**	**10°C p/ 40°C**	**10°C p/ 50°C**
r12	3%	-3%	0%	10%
r14	11%	16%	32%	42%
r15	1%	1%	31%	25%
r16	0%	1%	9%	9%
r23	-2%	-3%	8%	19%
r25	0%	5%	23%	49%
r26	-2%	1%	9%	17%
r36	-1%	2%	12%	13%
r42	-2%	7%	17%	24%
r43	2%	10%	17%	22%
r45	2%	11%	23%	38%
r53	0%	3%	15%	45%
r56	-3%	4%	21%	20%

Fonte: Elaboração do próprio autor

A figura 52 mostra a comparação dos gráficos das diversas resistência em função da temperatura.

Figura 52 – Gráfico dos valores RMS pela temperatura.

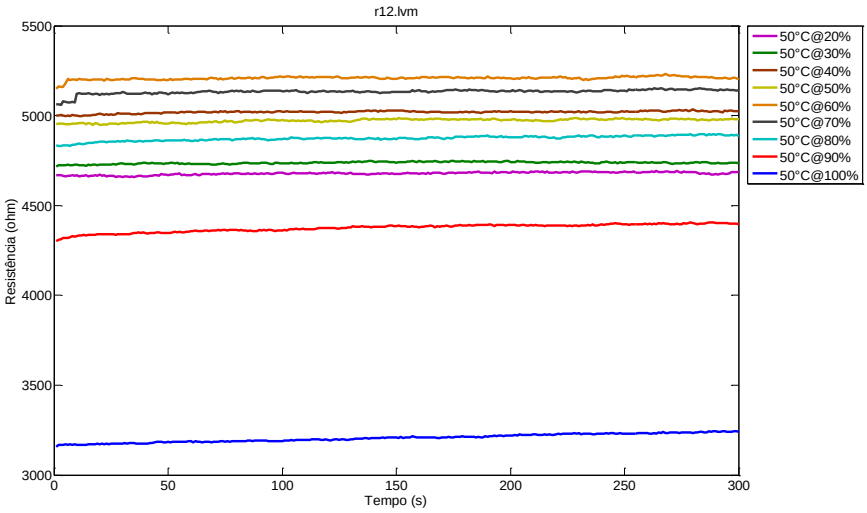


Fonte: Elaboração do próprio autor

De forma geral todas as resistências RMS aumentaram conforme houve o aumento da temperatura, no entanto, somente para a temperatura máxima de 50°C houve um aumento mais expressivo na resistência.

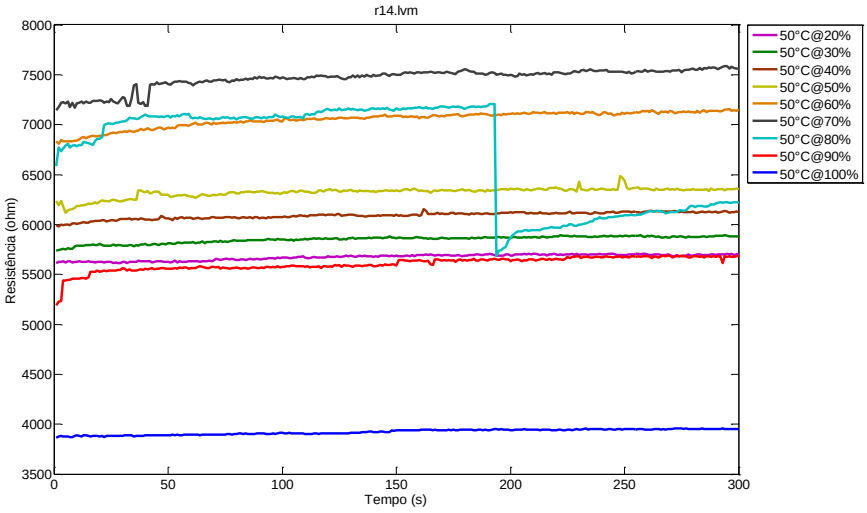
Em seguida realizaram-se medidas fixando a temperatura a 50°C e variando a umidade de 20 a 100%. A temperatura de 50°C foi escolhida por ser a maior temperatura medida nas medidas de umidade constante, pois quanto maior a temperatura, maior a distância entre as linhas de umidade (figura 20), garantindo um maior controle sobre a mesma. Quanto a umidade, 20% foi o menor valor o qual a câmara ambiental conseguiu atingir à 50°C. As figuras 53 a 65 mostram os gráficos de resistências obtidos.

Figura 53 – Gráfico do comportamento da resistência r12 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



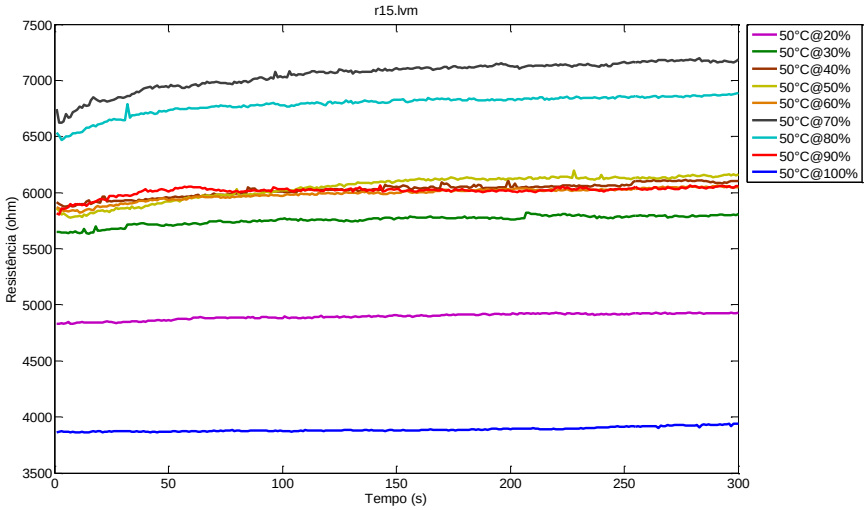
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 54 – Gráfico do comportamento da resistência r14 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



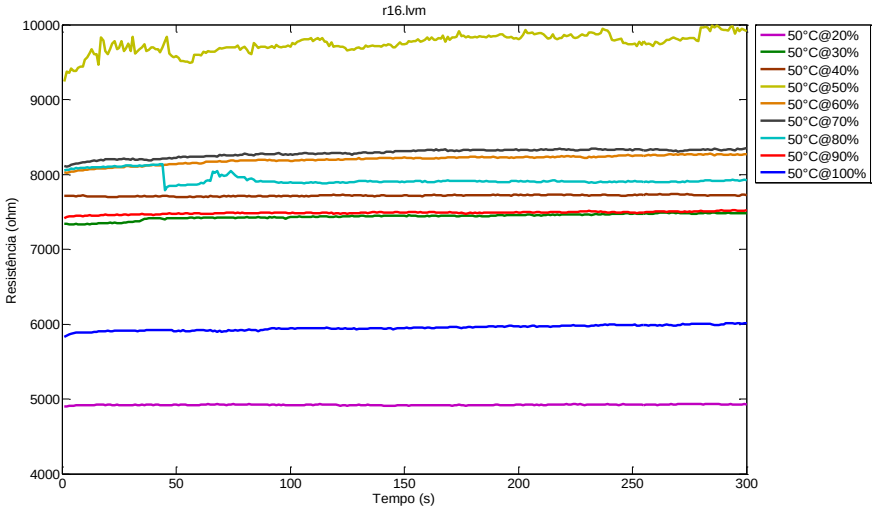
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 55 – Gráfico do comportamento da resistência r15 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



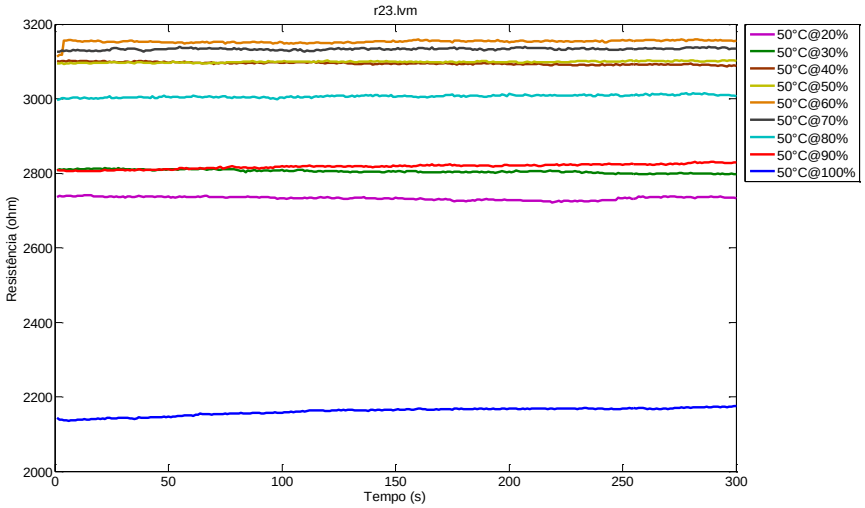
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 56 – Gráfico do comportamento da resistência r16 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



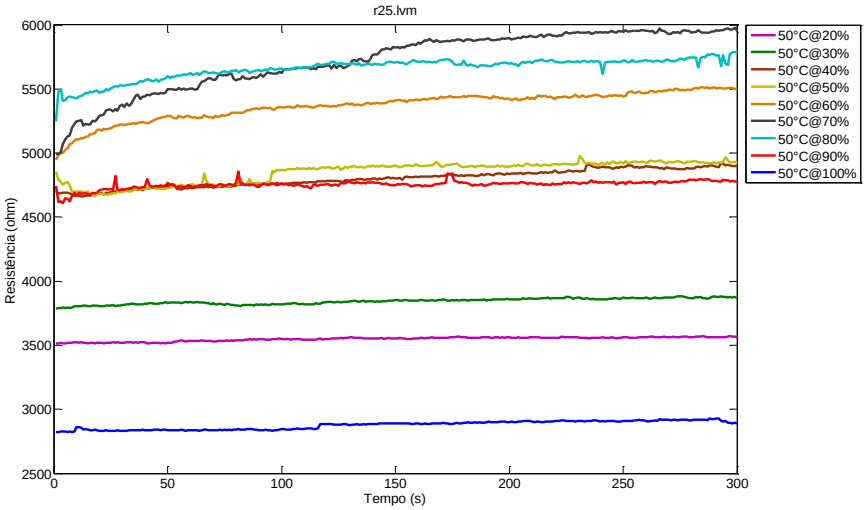
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 57 – Gráfico do comportamento da resistência r23 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



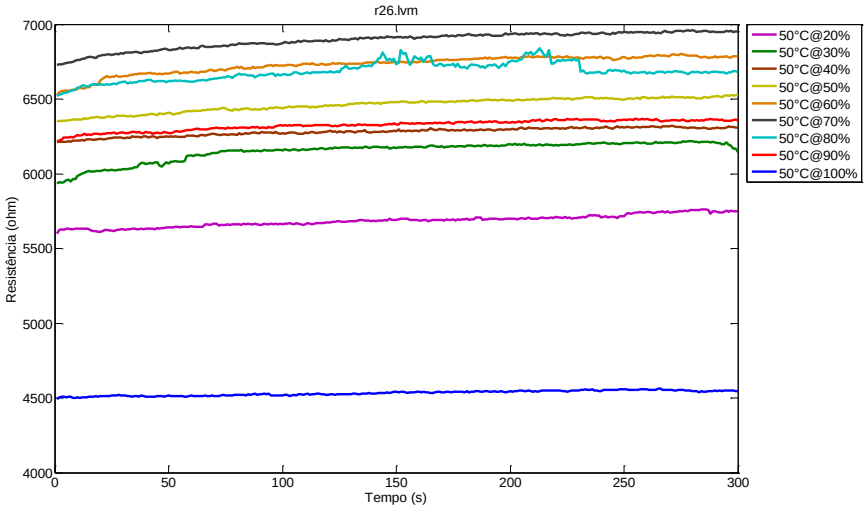
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 58 – Gráfico do comportamento da resistência r25 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



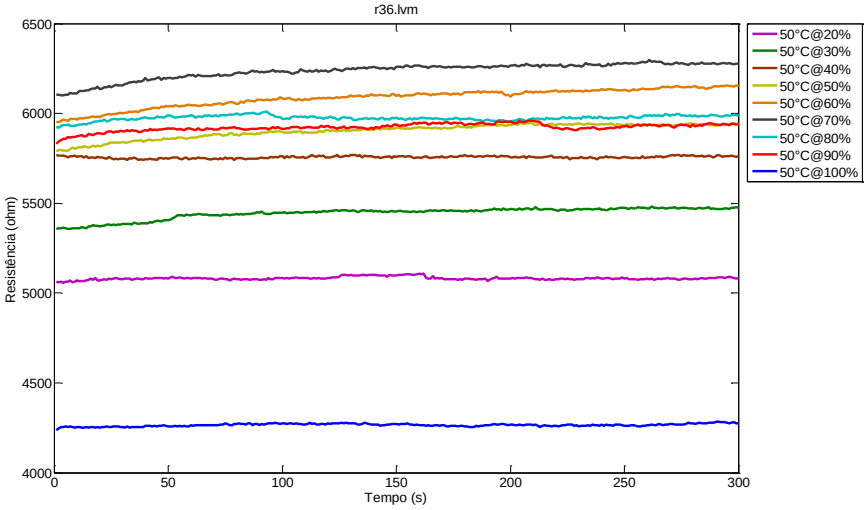
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 59 – Gráfico do comportamento da resistência r26 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



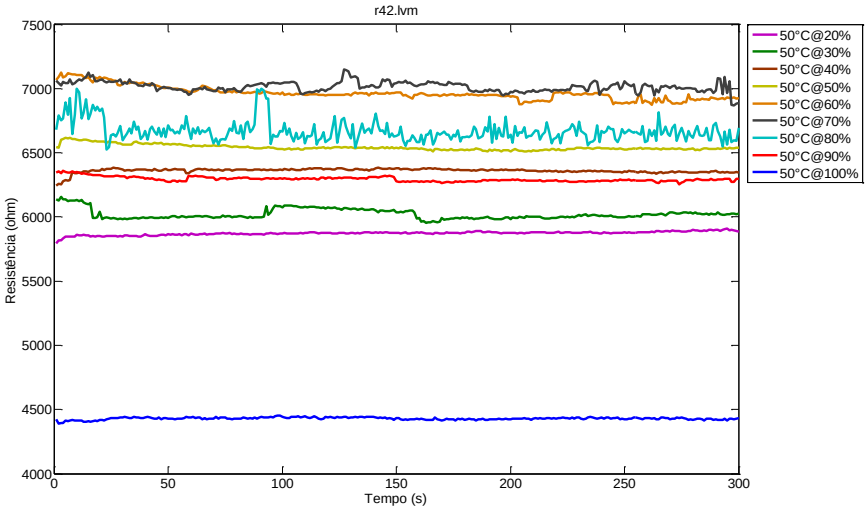
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 60 – Gráfico do comportamento da resistência r36 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



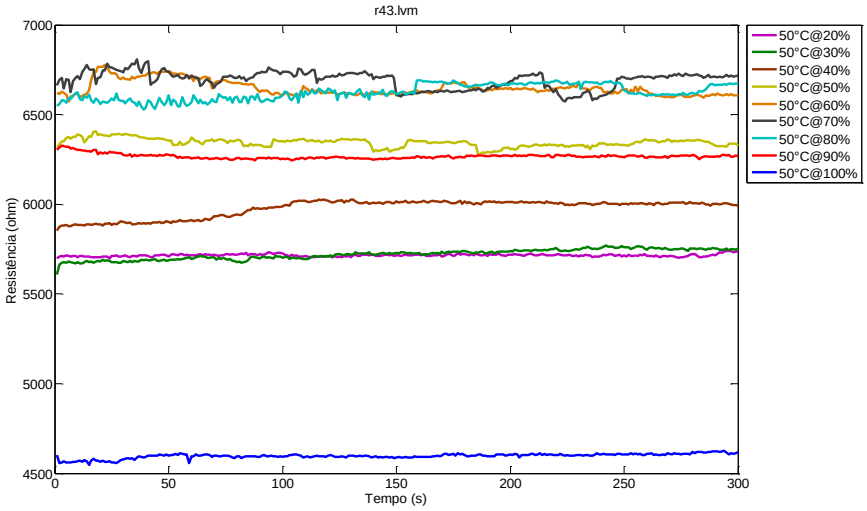
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 61 – Gráfico do comportamento da resistência r42 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



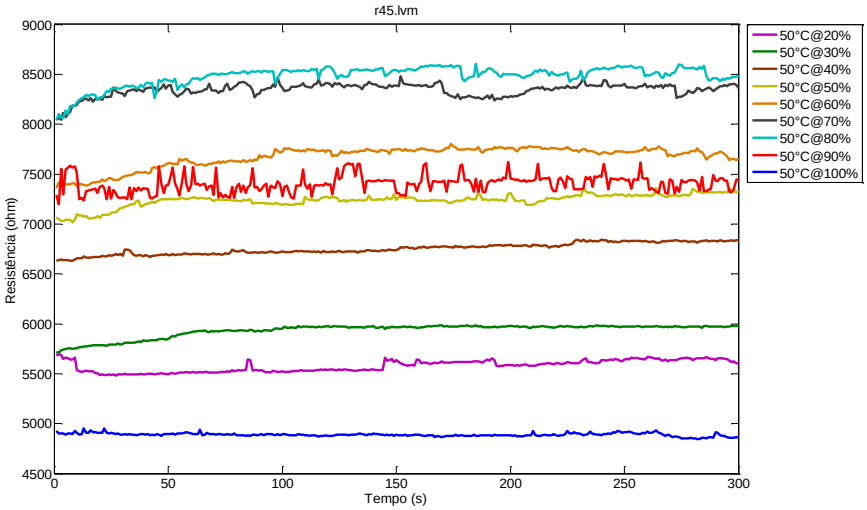
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 62 – Gráfico do comportamento da resistência r43 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



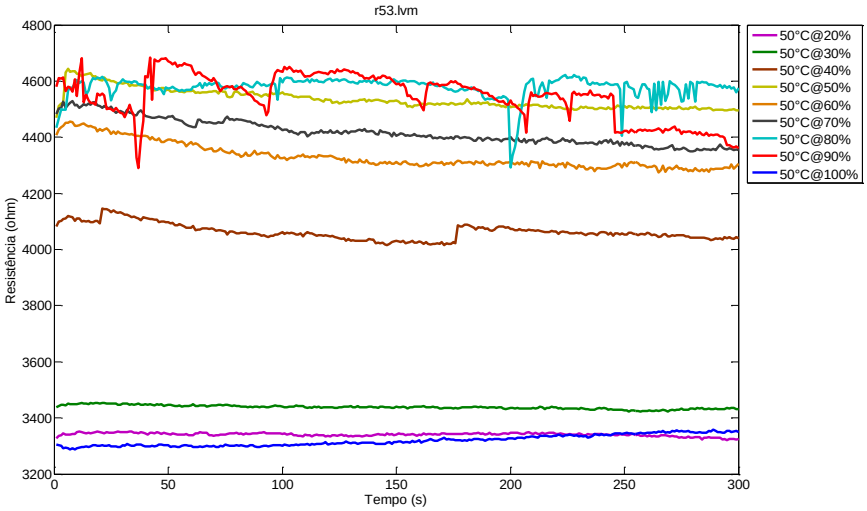
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 63 – Gráfico do comportamento da resistência r45 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



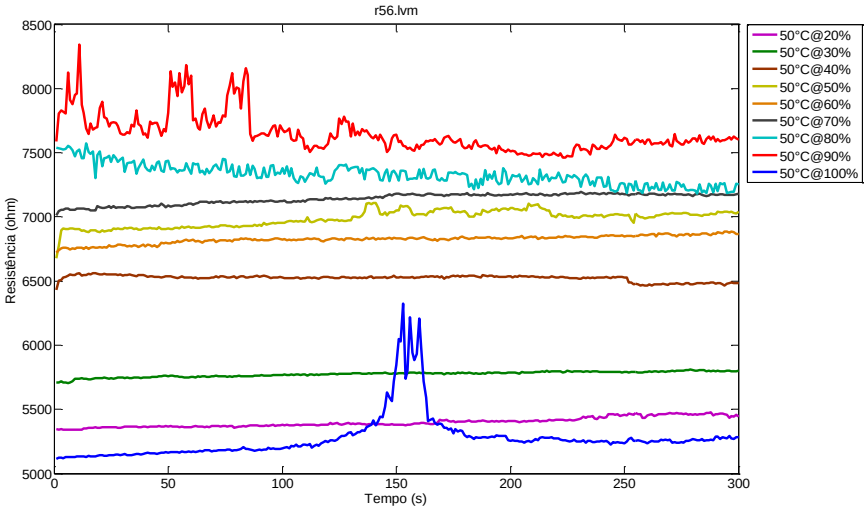
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 64 – Gráfico do comportamento da resistência r53 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 65 – Gráfico do comportamento da resistência r56 ao longo do tempo para cada uma das umidades testadas.



Fonte: Elaboração do próprio autor

De forma similar ao caso anterior a tabela 6 mostra as resistências RMS obtidas para cada umidade e a tabela 7 mostra a variação obtida de uma umidade para outra.

Tabela 6 – Valores RMS de cada resistência para variação da umidade mantendo a temperatura em 50°C para a placa D3 sem o dano.

	Valores RMS das resistências (Ohms)								
	50°C@20%	**50°C@30%**	**50°C@40%**	**50°C@50%**	**50°C@60%**	**50°C@70%**	**50°C@80%**	**50°C@90%**	**50°C@100%**
r12	4678,2	4737,2	5019,4	4972,1	5208,7	5133,0	4873,6	4374,8	3206,2
r14	5672,5	5850,4	6090,6	6323,0	7054,0	7462,7	6732,3	5606,3	3922,5
r15	4895,6	5755,9	6024,8	6047,6	5988,2	7053,6	6788,4	6014,8	3888,5
r16	4921,8	7437,1	7717,5	9755,4	8199,0	8285,3	7935,1	7486,6	5949,8
r23	2732,9	2805,1	3094,8	3098,7	3153,2	3133,4	3006,7	2818,3	2160,6
r25	3548,4	3843,0	4801,4	4853,1	5370,7	5728,4	5661,7	4753,7	2876,8
r26	5685,2	6152,8	6281,1	6461,5	6731,4	6892,8	6684,1	6325,3	4532,5
r36	5082,1	5444,9	5756,3	5902,7	6087,1	6237,2	5974,7	5922,5	4265,4
r42	5872,7	6021,6	6360,9	6541,8	6965,1	7014,8	6669,9	6294,3	4429,7
r43	5715,4	5721,1	5977,7	6344,1	6648,0	6693,4	6624,4	6267,3	4597,0
r45	5577,7	5933,9	6752,7	7237,5	7672,9	8343,5	8482,4	7403,3	4888,9
r53	3340,8	3438,3	4063,1	4535,2	4332,1	4418,7	4577,9	4546,3	3319,1
r56	5399,0	5774,5	6523,2	6986,2	6825,4	7141,4	7329,8	7649,7	5277,4

Fonte: Elaboração do próprio autor

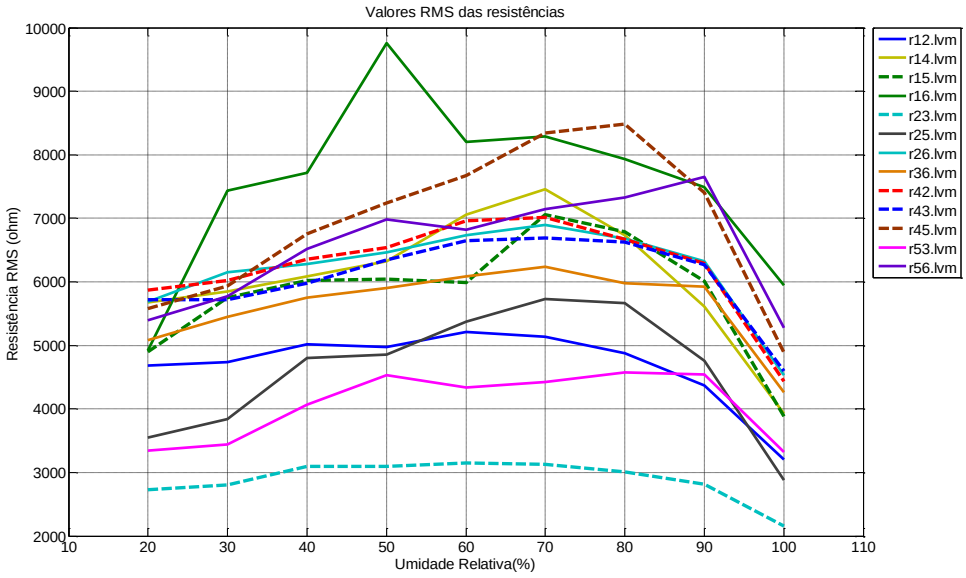
Tabela 7 – Comparações de resistências para variação da umidade mantendo a temperatura em 50°C para a placa D3 sem o dano.

	20% p/ 30%	20% p/ 40%	20% p/ 50%	20% p/ 60%	20% p/ 70%	20% p/ 80%	20% p/ 90%	20% p/ 100%
r12	1%	7%	6%	11%	10%	4%	-6%	-31%
r14	3%	7%	11%	24%	32%	19%	-1%	-31%
r15	18%	23%	24%	22%	44%	39%	23%	-21%
r16	51%	57%	98%	67%	68%	61%	52%	21%
r23	3%	13%	13%	15%	15%	10%	3%	-21%
r25	8%	35%	37%	51%	61%	60%	34%	-19%
r26	8%	10%	14%	18%	21%	18%	11%	-20%
r36	7%	13%	16%	20%	23%	18%	17%	-16%
r42	3%	8%	11%	19%	19%	14%	7%	-25%
r43	0%	5%	11%	16%	17%	16%	10%	-20%
r45	6%	21%	30%	38%	50%	52%	33%	-12%
r53	3%	22%	36%	30%	32%	37%	36%	-1%
r56	7%	21%	29%	26%	32%	36%	42%	-2%

Fonte: Elaboração do próprio autor

A figura 66 mostra os gráficos dos valores das resistências RMS em função da umidade.

Figura 66 – Gráfico dos valores RMS pela umidade da placa D3.

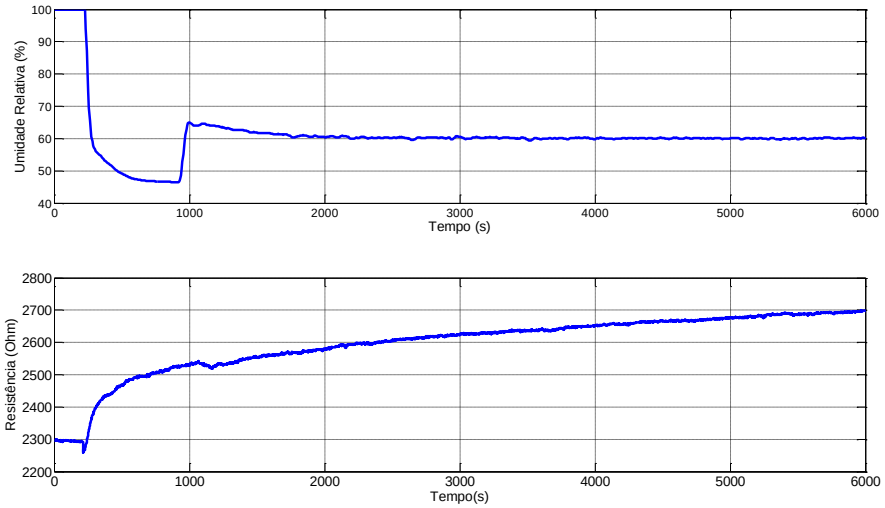


Fonte: Elaboração do próprio autor

Observando-se as variações dos valores RMS é possível notar que os valores das resistências têm um valor relativamente baixo com a umidade em 20% e conforme a umidade aumenta a resistência também aumenta, até atingir um máximo geralmente entre 60 e 80%. Depois deste ponto a resistência diminui um pouco em 90% e cai drasticamente quando atinge o valor de 100%. Como pode ser observado na tabela 7, quando a umidade atinge 100% a resistência cai para um valor menor que o valor inicial quando medido a 20%. É interessante notar que tanto no caso da temperatura quanto no caso da umidade, existe uma grande diferença entre os valores obtidos nas faixas intermediárias de temperatura (20 a 40°C) e de umidade (20 a 80%) e os valores máximos (50ºC e 100%). Outra observação interessante é que enquanto a temperatura máxima causa um aumento na resistência, a umidade máxima causa uma diminuição, no entanto em média a umidade de 100% causa uma diminuição maior do que o aumento causado pela temperatura, fazendo com que as medições sejam levemente menores que as medições a 30°C e 70% (valor mais próximo a temperatura e umidade padrão da cidade). Uma possível solução para isto seria isolar o sensor com algum revestimento que o proteja da umidade externa, ficando somente com a influência da temperatura, que é relativamente baixa. Outra solução seria implementar um algoritmo de inteligência artificial para tentar diferenciar as flutuações causadas por cada tipo de alteração ambiental, de forma que ele consiga filtrar estas variações e apresentar somente as variações referentes a possíveis danos.

Um terceiro conjunto de medições foi obtido realizando-se o monitoramento da resistência do caminho r25 enquanto a umidade variava continuamente de 100 a 60%, de forma a observar o comportamento transiente da resistência em relação à humidade. É importante notar que nos casos anteriores esperou-se um período de 30 min depois que a temperatura ou umidade desejada era atingida, de forma a medir somente a resistência após o período transiente. A figura 67 mostra os resultados desta medição.

Figura 67 – Medições de resistência enquanto variava-se a umidade.



Fonte: Elaboração do próprio autor

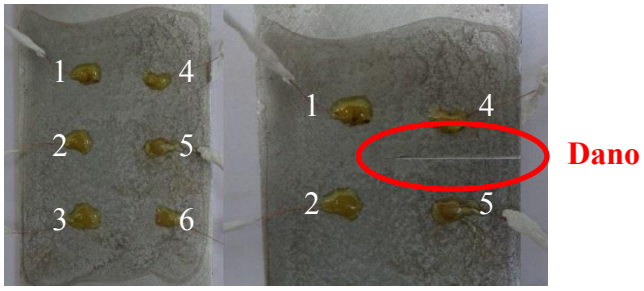
Analisando-se o resultado mostrado na figura 67 é possível notar que a resistência aumenta bruscamente quando a umidade se afasta dos 100% e a partir deste ponto tende a aumentar em um padrão lembrando o gráfico logarítmico, tendendo a um máximo que estaria entre 2,7 e 2,8 kΩ. Observa-se também que variações posteriores de umidade (observado em 1000s) não afetam significativamente este padrão, no qual é possível notar apenas um pequeno aumento na resistência. Um aumento da umidade para valores acima de 90% provoca uma queda na resistência, como visto na tabela 7.

Nos testes iniciais realizados antes das medições apresentadas, observou-se que o instrumento de medição é sensível a algum tipo de interferência proveniente da rede elétrica. Isso pode ser causado devido a oscilação causada pela câmara ambiental na rede. Embora não se saiba se a tomada ligada ao instrumento está na mesma linha da câmara, é possível observar que quando a câmara ativa os compressores (um compressor para refrigeração e outro para retirada de umidade) as luzes do laboratório enfraquecem brevemente. Para evitar esta interferência utilizou-se um estabilizador de computador para tentar filtrar tais oscilações. Além disto, o estabilizador foi ligado utilizando o aterramento (com a recente mudança de padrões de tomada, muitos adaptadores vêm sem o pino de aterramento, no entanto para este caso foi utilizado um adaptador COM o pino) e utilizou-se um cabo “jacaré-banana” para aterrar diretamente o instrumento a um ponto de aterramento (vareta de cobre enterrada)

presente no laboratório. Mesmo assim em alguns momentos observou-se algumas interferências nas medidas.

Utilizando a mesma placa (D3) simulou-se um dano sobre a placa, na forma de um corte entre os terminais 4 e 5 até a metade da placa e repetiu-se as medições realizadas antes do dano. A figura 68 mostra o dano inserido na placa e a tabela 9 mostra os resultados em valores RMS.

Figura 68 – Placa D3 antes do dano e depois do dano.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 8 – Valores RMS de cada resistência para variação da temperatura mantendo a umidade em 70% para a placa D3.

	Valores RMS das resistências (Ohms)				
	10°C@70%	**20°C@70%**	**30°C@70%**	**40°C@70%**	**50°C@70%**
r12	5297,0	5118,2	5086,6	5105,1	5188,6
r14	6657,7	6475,8	5748,0	6344,9	6014,7
r15	6502,1	6038,7	6169,4	6153,2	6981,7
r16	8379,6	8123,3	8920,8	9021,7	9960,7
r23	2383,7	2212,9	2213,0	2322,7	2394,5
r25	3027,6	3013,3	3278,4	3440,1	4172,2
r26	5684,7	5646,8	6182,4	6774,2	7664,3
r36	5285,0	5217,2	5878,7	6228,7	6833,2
r42	7655,0	6127,8	6908,8	7216,6	6859,1
r43	7379,8	5924,2	6729,7	7087,8	6538,5
r45	8526,5	7053,2	7796,3	9147,8	8388,0
r53	3258,4	3330,0	3523,1	3944,6	3802,3
r56	5628,3	5575,2	5909,5	6848,6	6858,5

Fonte: Elaboração do próprio autor

A tabela 9 mostra as comparações entre as diferentes temperaturas, a tabela 10 mostra a comparação entre os valores da tabela 4 (sem dano) e a tabela 8 (com dano) e a figura 69

mostra a comparação dos gráficos da resistência antes e depois do dano, para a temperatura de 30ºC e umidade de 70%.

Tabela 9 – Comparações de resistências para variação da temperatura mantendo a umidade em 70% para a placa D3.

	10°C p/ 20°C	10°C p/ 30°C	10°C p/ 40°C	10°C p/ 50°C
r12	-3%	-4%	-4%	-2%
r14	-3%	-14%	-5%	-10%
r15	-7%	-5%	-5%	7%
r16	-3%	6%	8%	19%
r23	-7%	-7%	-3%	0%
r25	0%	8%	14%	38%
r26	-1%	9%	19%	35%
r36	-1%	11%	18%	29%
r42	-20%	-10%	-6%	-10%
r43	-20%	-9%	-4%	-11%
r45	-17%	-9%	7%	-2%
r53	2%	8%	21%	17%
r56	-1%	5%	22%	22%

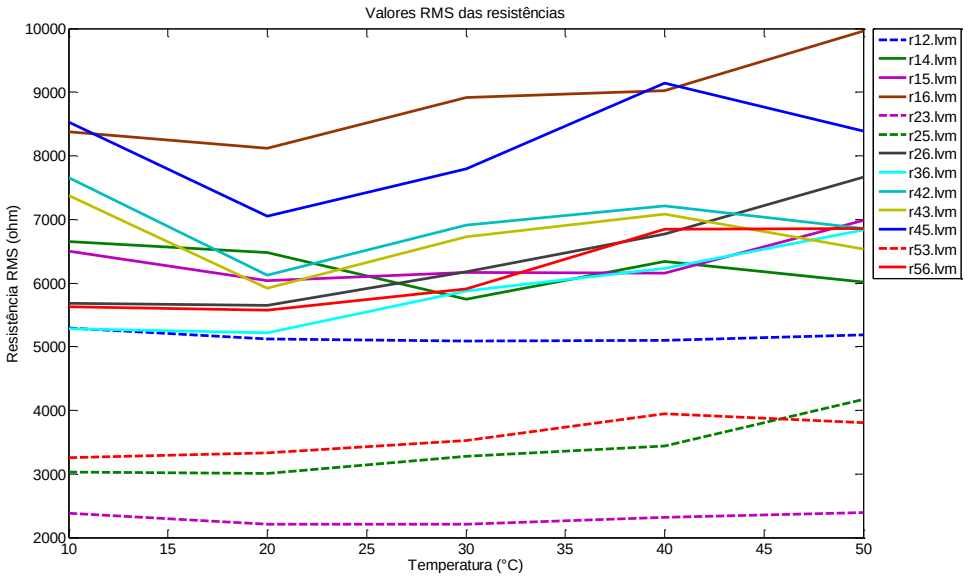
Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 10 – Comparação entre a placa sem dano e com dano variando a temperatura (D3).

	Comparações				
	10°C@70%	20°C@70%	30°C@70%	40°C@70%	50°C@70%
r12	43%	35%	42%	38%	28%
r14	51%	32%	12%	9%	-4%
r15	44%	33%	35%	5%	24%
r16	20%	15%	26%	18%	31%
r23	22%	16%	17%	10%	3%
r25	5%	5%	8%	-2%	-2%
r26	3%	4%	10%	12%	18%
r36	2%	2%	11%	8%	17%
r42	57%	29%	32%	27%	14%
r43	56%	22%	29%	28%	13%
r45	64%	33%	35%	44%	17%
r53	3%	6%	9%	9%	-17%
r56	-4%	-1%	-3%	-3%	-3%

Fonte: Elaboração do próprio autor

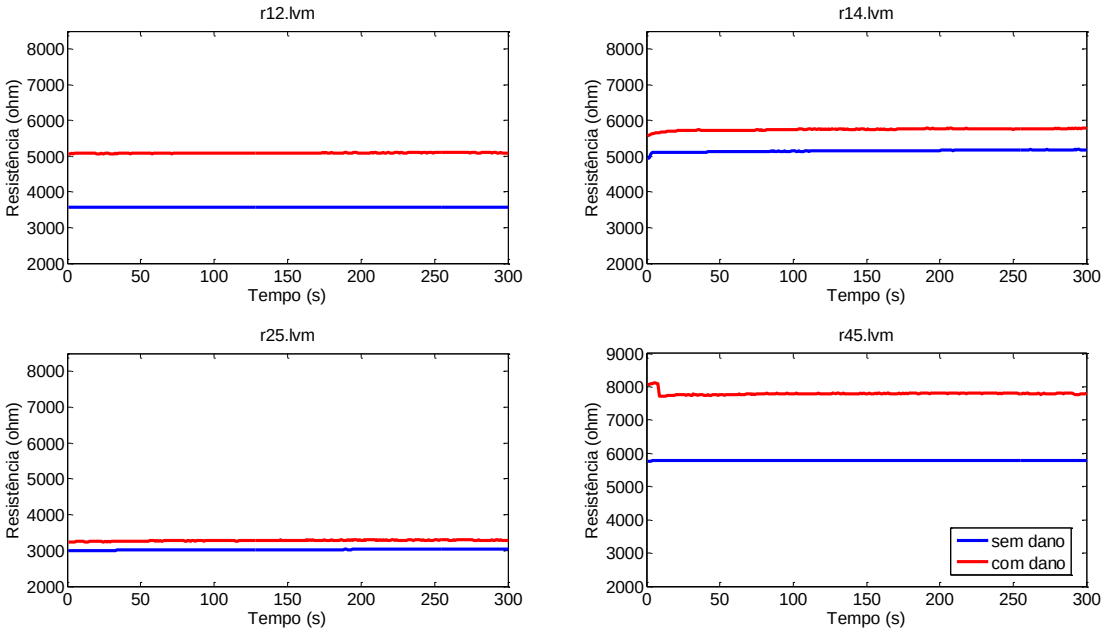
Figura 69 – Gráfico dos valores RMS pela temperatura da placa D3 após o dano.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A figura 70 mostra a comparação dos gráficos da resistência antes e depois do dano, para a temperatura de 30ºC e umidade de 70% para os caminhos próximos ao dano.

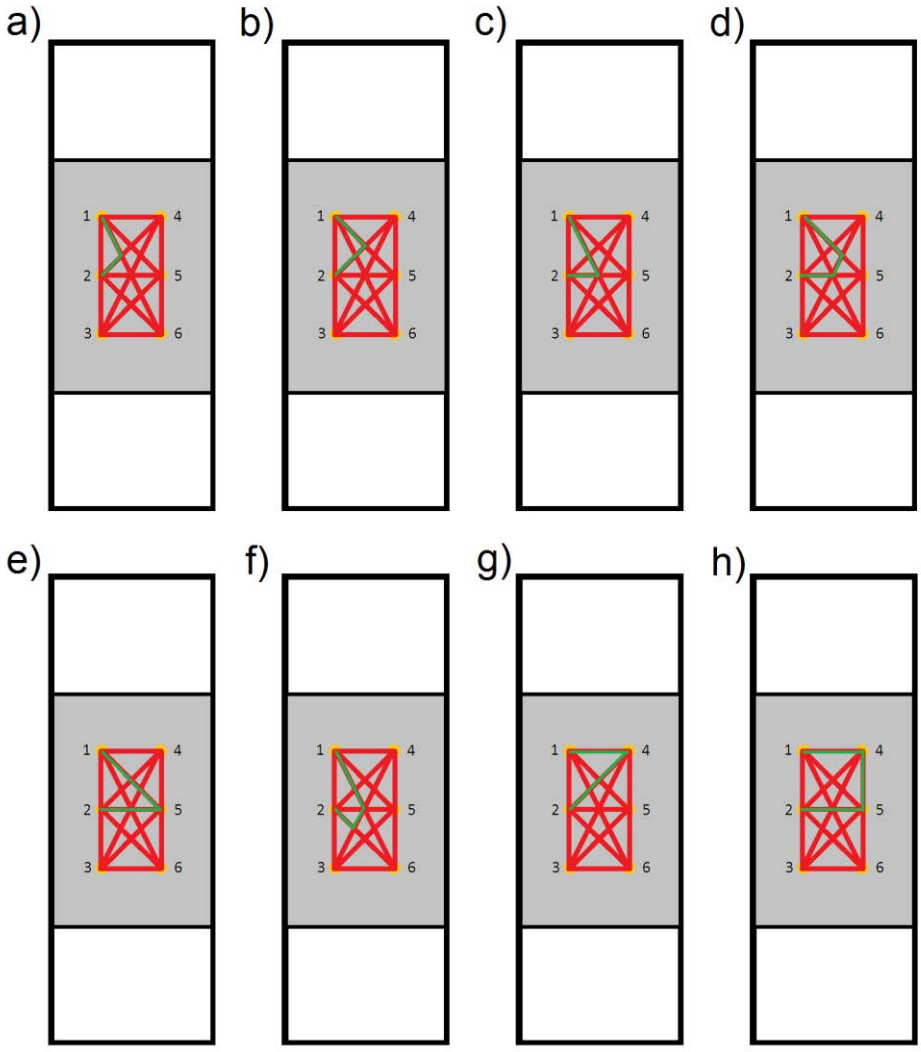
Figura 70 – Comparação das resistências dos caminhos próximos ao dano na placa D3 a 30ºC e umidade de 70%.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Observando-se a tabela 10 é possível notar que até a temperatura de 30ºC os caminhos r15, r16, r42, r43 e r45 apresentaram variações de 17 a 64% nas resistências, as variações nos caminhos r15, r16, r42 e r43, e o fato dos caminhos r25, r26, r36, r53 e r56 não terem variado nos levariam a crer que o dano estaria na região central do quadrante 1-2-5-4 (seguindo o sentido anti-horário). A variação em r23 e em r14 não foi constante, podendo indicar que as alterações nos outros caminhos tenham causado alterações indiretas sobre elas. A figura 71 mostra como a corrente pode percorrer diversos caminhos entre um mesmo par de terminais.

Figura 71 – Diversas possibilidades de caminho que a corrente pode percorrer.

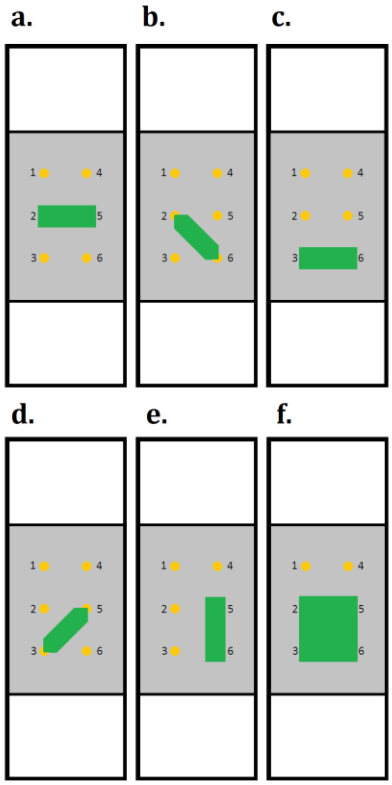


Fonte: Elaboração do próprio autor

Se considerarmos que uma placa efetivamente apresente uma condutividade conforme os caminhos mostrados pelas linhas vermelhas da figura 71, ao medirmos somente um caminho (por exemplo o caminho 1-2 ou r12), a corrente pode percorrer diversos caminhos diferentes, dessa forma um dano em qualquer outro caminho (r14 por exemplo) também afetará a resistência r12, tornando processo de localização do dano mais complicado.

Outra forma de se interpretar os dados é verificando as medições que não sofreram aumento, ou seja, verificando os locais onde supostamente não haveria um dano. Desta forma a avaliação das medições que indicaram aumento na resistência seria realizada após a exclusão dos locais onde não haveria danos. A figura 72 mostra esta análise.

Figura 72 – Análise dos locais livres de danos da placa D3.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Como já se sabe que os supostos "caminhos" não são na realidade linhas retas entre os pontos, mas uma pequena área entre eles, considerou-se que o fato de uma dada medição não indicar alterações significativas eliminaria tal área como sendo danificada. Além disso, considerou-se também que o dano é contínuo, ou seja, caso exista um dano na estrutura, este

dano cresce ou se propaga, eliminando assim a possibilidade de haver dois danos em locais distintos de uma mesma placa. Esta simplificação ajuda a delimitar a área em que se pode haver dano, pois considera que sempre que o dano atravessar um dos caminhos, tal caminho sofrerá grandes alterações em suas medições.

Com isto a área não danificada foi delimitada em verde, como mostra as figuras 72a, 72b, 72c, 72d e 72e. Depois de delimitadas as áreas correspondentes a cada caminho, uniram-se todas elas, de forma a se obter uma área maior (figura 72f). Através desta análise é possível verificar que o dano só poderia estar no quadrante superior da placa, já que todo o quadrante inferior foi eliminado. O passo final seria verificar quais medições apresentaram maiores alterações. Como as medições envolvendo o terminal 4 apresentaram as maiores alterações, conclui-se que o dano está em uma região próxima a ele.

A tabela 11 mostra as medições variando-se a umidade e mantendo a temperatura em 50ºC.

Tabela 11 – Valores RMS de cada resistência para variação da umidade mantendo a temperatura em 50°C para a placa D3.com o dano.

	Valores RMS das resistências (Ohms)								
	50°C@20%	**50°C@30%**	**50°C@40%**	**50°C@50%**	**50°C@60%**	**50°C@70%**	**50°C@80%**	**50°C@90%**	**50°C@100%**
r12	5499,1	5628,9	5567,6	5593,9	5728,4	5613,9	5368,0	4857,8	3606,0
r14	6032,1	6197,7	6518,7	6521,9	6561,1	6485,8	6363,9	4529,3	3672,9
r15	6559,5	6601,5	6680,7	6648,0	7405,3	7607,2	6347,5	6498,4	4460,3
r16	8612,6	9088,6	9986,2	10365,1	10302,7	9960,6	13891,8	11453,4	6875,6
r23	2683,4	2719,0	2756,9	2798,5	2764,7	2705,6	2575,6	2377,4	1788,9
r25	3925,8	4241,8	4491,4	4276,3	4647,3	4888,0	4420,4	3414,8	2553,9
r26	6075,2	7109,9	6883,6	8512,9	7674,8	7692,3	7265,3	6897,7	5799,0
r36	5476,8	5762,2	5899,3	6626,8	7033,5	7064,0	6900,1	7927,0	6558,8
r42	7224,7	7387,1	7649,1	7775,2	8112,3	8142,7	8152,1	7043,0	4879,1
r43	6419,9	6619,6	6691,8	6912,6	7366,6	7631,1	7753,1	6938,9	4969,1
r45	8200,0	8721,1	8425,0	8848,8	10010,5	9600,6	10008,2	8829,3	6279,7
r53	3974,1	3683,6	3927,4	3838,3	4486,5	4159,0	4340,9	4294,3	3360,5
r56	6176,5	6093,3	6416,6	6707,9	4397,4	7953,0	8058,9	7247,7	5339,9

Fonte: Elaboração do próprio autor

A tabela 12 mostra as comparações entre as diferentes umidades, a tabela 13 mostra a comparação entre os valores da tabela 6 (sem dano) e a tabela 11 (com dano) e a figura 73 mostra o gráfico das resistências RMS em função da umidade relativa.

Tabela 12 **– Comparações de resistências para variação da umidade mantendo a temperatura em 50°C para a placa D3 com o dano.**

	20% p/ 30%	20% p/ 40%	20% p/ 50%	20% p/ 60%	20% p/ 70%	20% p/ 80%	20% p/ 90%	20% p/ 100%
r12	2%	1%	2%	4%	2%	-2%	-12%	-34%
r14	3%	8%	8%	9%	8%	6%	-25%	-39%
r15	1%	2%	1%	13%	16%	-3%	-1%	-32%
r16	6%	16%	20%	20%	16%	61%	33%	-20%
r23	1%	3%	4%	3%	1%	-4%	-11%	-33%
r25	8%	14%	9%	18%	25%	13%	-13%	-35%
r26	17%	13%	40%	26%	27%	20%	14%	-5%
r36	5%	8%	21%	28%	29%	26%	45%	20%
r42	2%	6%	8%	12%	13%	13%	-3%	-32%
r43	3%	4%	8%	15%	19%	21%	8%	-23%
r45	6%	3%	8%	22%	17%	22%	8%	-23%
r53	-7%	-1%	-3%	13%	5%	9%	8%	-15%
r56	-1%	4%	9%	-29%	29%	30%	17%	-14%

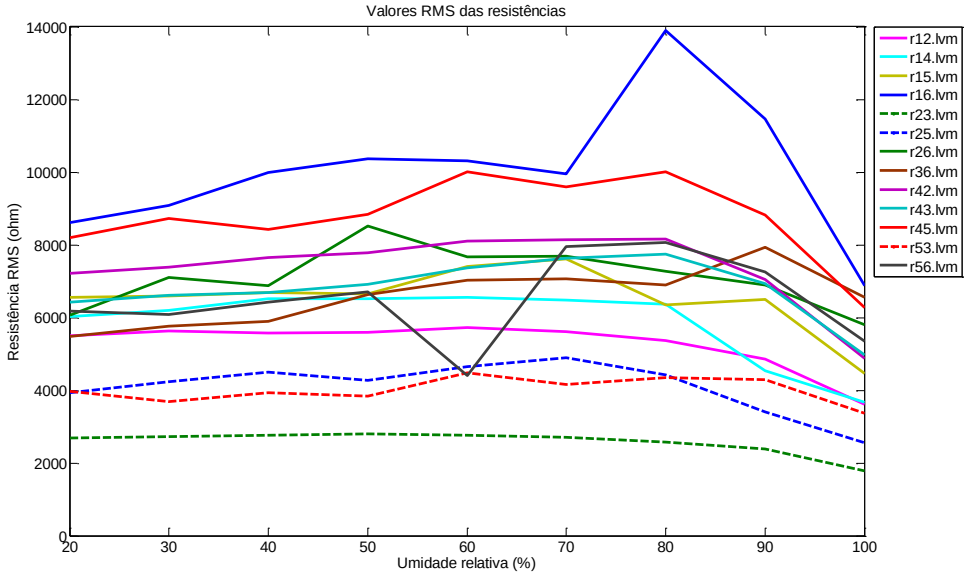
Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 13 – Comparação entre as placas com dano e sem dano variando a umidade da placa D3.

	50°C@ 20%	50°C@ 30%	50°C@ 40%	50°C@ 50%	50°C@ 60%	50°C@ 70%	50°C@ 80%	50°C@ 90%	50°C@ 100%
r12	18%	19%	11%	13%	10%	9%	10%	11%	12%
r14	6%	6%	7%	3%	-7%	-13%	-5%	-19%	-6%
r15	34%	15%	11%	10%	24%	8%	-6%	8%	15%
r16	75%	22%	29%	6%	26%	20%	75%	53%	16%
r23	-2%	-3%	-11%	-10%	-12%	-14%	-14%	-16%	-17%
r25	11%	10%	-6%	-12%	-13%	-15%	-22%	-28%	-11%
r26	7%	16%	10%	32%	14%	12%	9%	9%	28%
r36	8%	6%	2%	12%	16%	13%	15%	34%	54%
r42	23%	23%	20%	19%	16%	16%	22%	12%	10%
r43	12%	16%	12%	9%	11%	14%	17%	11%	8%
r45	47%	47%	25%	22%	30%	15%	18%	19%	28%
r53	19%	7%	-3%	-15%	4%	-6%	-5%	-6%	1%
r56	14%	6%	-2%	-4%	-36%	11%	10%	-5%	1%

Fonte: Elaboração do próprio autor

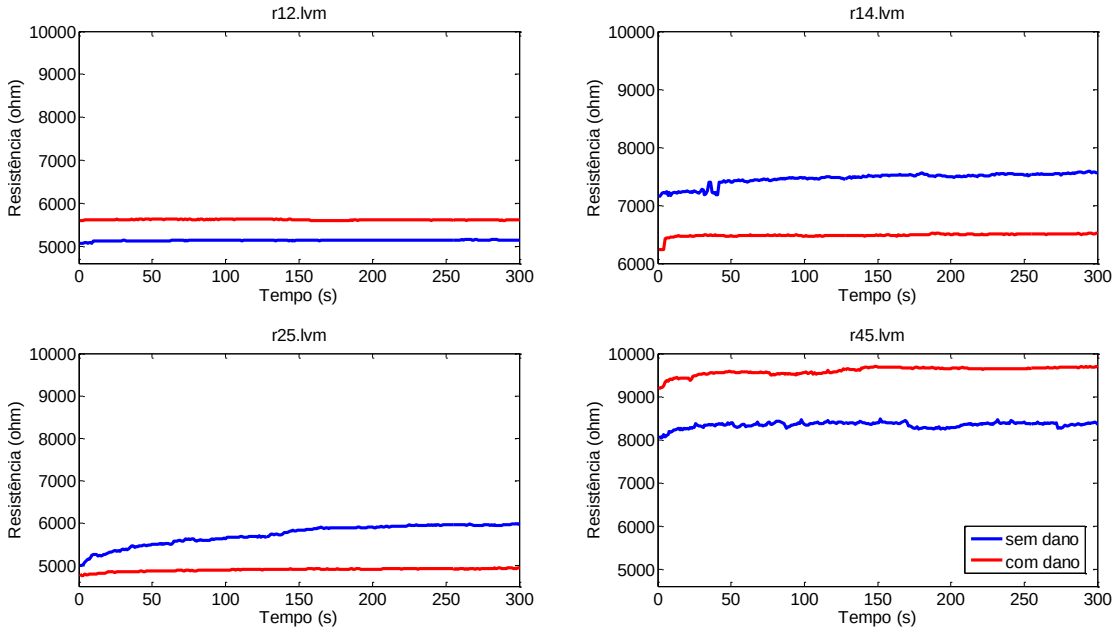
Figura 73 – Gráfico dos valores RMS pela umidade da placa D3 com o dano.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A figura 74 mostra a comparação dos gráficos antes e depois do dano para a umidade de 70% e temperatura de 50°C.

Figura 74 – Comparação das resistências dos caminhos próximos ao dano na placa D3 a 50°C e umidade de 70%.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Observando-se a tabela 13, nota-se que a localização do dano se torna um problema quando existe a variação da umidade. Uma solução para isso seria o isolamento do sensor utilizando algum tipo de revestimento, de forma que o sensor não entrasse em contanto com a umidade do ambiente. No entanto, observa-se pela figura 74 que a variação da resistência é muito maior que a variação da umidade e isto poderia ser um indicativo da ocorrência do dano. Conclui-se, parcialmente, que se não houver o isolamento do sensor, uma alternativa seria definir padrões de variação da resistência para distinguir estes efeitos. Para isto, novos e mais testes devem ser realizados.

Repetiu-se o procedimento da variação da temperatura para a placa D4 e o procedimento de variação da umidade para a placa D5.

5.2.2 Placa D4

A tabela 14 mostra os resultados obtidos para a placa D4 variando-se a temperatura e fixando a umidade.

Tabela 14 – Valores RMS das resistências na placa D4 sem dano, variando a temperatura.

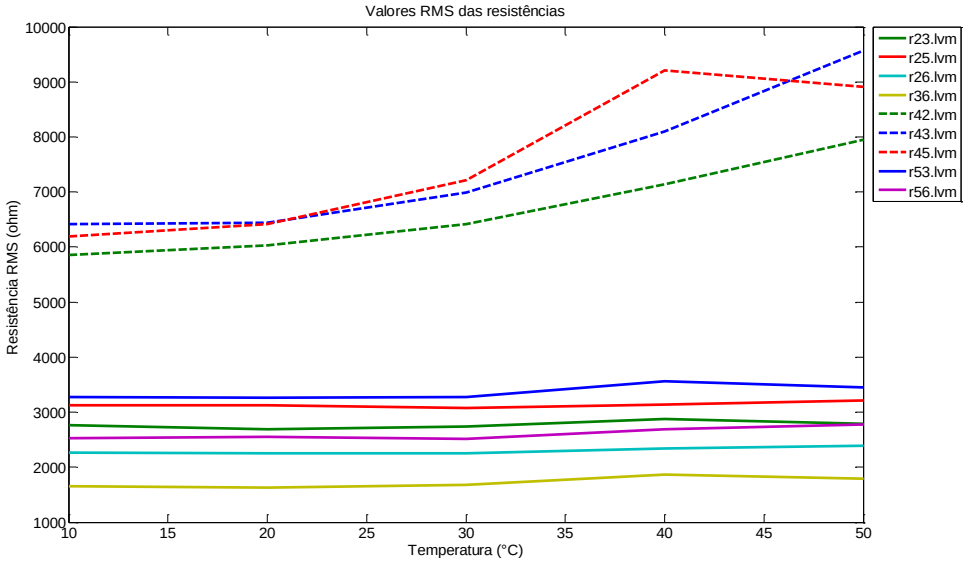
	Valores RMS das resistências (Ohms)				
	10°C@70%	**20°C@70%**	**30°C@70%**	**40°C@70%**	**50°C@70%**
r12	678499	672905	278348	431083	645539
r14	668702	650689	277504	448486	649138
r15	688772	651483	302393	688246	636834
r16	683474	652122	355558	690919	629580
r23	2759,7	2693,2	2740,3	2875,4	2794,6
r25	3121,5	3120,2	3077,5	3139,9	3210,0
r26	2268,5	2250,3	2257,4	2334,5	2395,4
r36	1656,6	1631,3	1676,7	1868,5	1793,8
r42	5850,6	6024,4	6417,1	7134,5	7954,1
r43	6411,9	6435,1	6991,0	8093,7	9570,1
r45	6187,1	6410,8	7215,7	9202,4	8911,7
r53	3269,6	3263,8	3274,9	3565,8	3451,0
r56	2523,0	2554,3	2519,6	2682,9	2777,8

Fonte: Elaboração do próprio autor

É possível notar que todos os caminhos ligados ao terminal 1 estão altos e com grandes oscilações. Isto indicaria que o terminal 1 estaria com algum mau contato, já que todas as outras resistências não apresentaram a mesma magnitude ou oscilação. Como o processo de soldagem é irreversível e não se consegue avaliar a qualidade do processo até que a solda tenha secado completamente, este é um tipo de problema que é possível ocorrer de tempos em tempos, sendo que a única forma de resolvê-lo seria adotar um procedimento meticuloso de soldagem, para evitar ao máximo este tipo de problema.

A figura 75 mostra os gráficos das resistências RMS, mantendo a umidade constante em 70%. As medidas com o terminal 1 foram retiradas, pois a diferença entre as ordens de grandeza seriam muito discrepantes.

Figura 75 – Gráfico dos valores RMS pela temperatura, mantendo a umidade constante em 70% da placa D4 sem o dano.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Mesmo com este empecilho todas as outras medições se mostram uniformes e constantes, o que justifica a utilização desta placa. A tabela 15 mostra as comparações com as diferentes temperaturas.

Tabela 15 – Comparações de resistências para variação da temperatura mantendo a umidade constante para a placa D4 sem o dano.

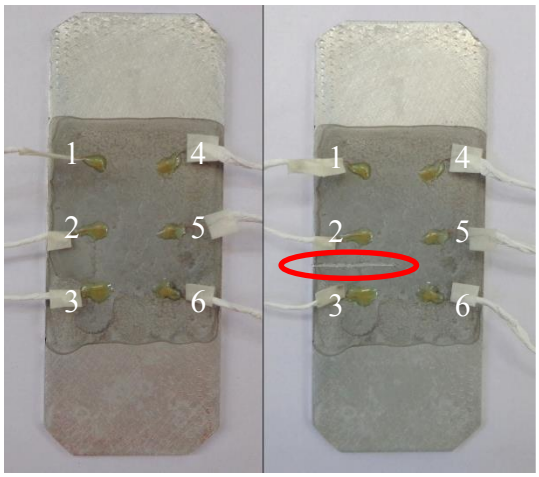
	10°C p/ 20°C	10°C p/ 30°C	10°C p/ 40°C	10°C p/ 50°C
r12	-1%	-59%	-36%	-5%
r14	-3%	-59%	-33%	-3%
r15	-5%	-56%	0%	-8%
r16	-5%	-48%	1%	-8%
r23	-2%	-1%	4%	1%
r25	0%	-1%	1%	3%
r26	-1%	0%	3%	6%
r36	-2%	1%	13%	8%
r42	3%	10%	22%	36%
r43	0%	9%	26%	49%
r45	4%	17%	49%	44%
r53	0%	0%	9%	6%
r56	1%	0%	6%	10%

Fonte: Elaboração do próprio autor

Pode-se notar que com esta placa os resultados foram mais consistentes, mostrando uma clara tendência no aumento da resistência com o aumento da temperatura, confirmando as conclusões obtidas na placa anterior.

Da mesma forma que no caso anterior, simulou-se um dano na placa. Neste caso o dano foi criado entre os terminais dois e três, pois as medições nesta região mostraram-se mais constantes. A figura 76 mostra as fotos da placa antes e depois do dano e a tabela 16 mostra os valores RMS das resistências depois do dano para variação de temperatura e com a umidade constante em 70%.

Figura 76 – Placa D4 antes do dano e depois do dano D4.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 16 – Valores RMS das resistências na placa com dano variando a temperatura e com umidade constante em 70% da placa D4.

	Valores RMS das resistências (Ohms)				
	10°C@70%	**20°C@70%**	**30°C@70%**	**40°C@70%**	**50°C@70%**
r12	1070736	990039	947889	933943	935052
r14	1104055	950036	949660	959761	4160566
r15	1078849	960848	936040	970121	4377852
r16	1076231	185076	965221	955668	5065655
r23	3875,0	3801,5	3893,3	3773,7	3664,0
r25	4239,3	4123,7	4024,9	3916,2	3825,9
r26	3037,5	2990,5	2946,5	2821,0	2751,3
r36	2254,9	2052,4	2245,8	2167,4	2097,6
r42	10798,9	10315,1	9898,5	10149,9	9508,2
r43	11266,4	10779,0	10785,1	10729,6	10445,7
r45	10204,4	10807,7	10246,4	10381,7	10445,2
r53	4401,0	4269,9	4373,6	4256,0	4062,7
r56	3436,6	3174,2	3289,6	3176,7	3044,3

Fonte: Elaboração do próprio autor

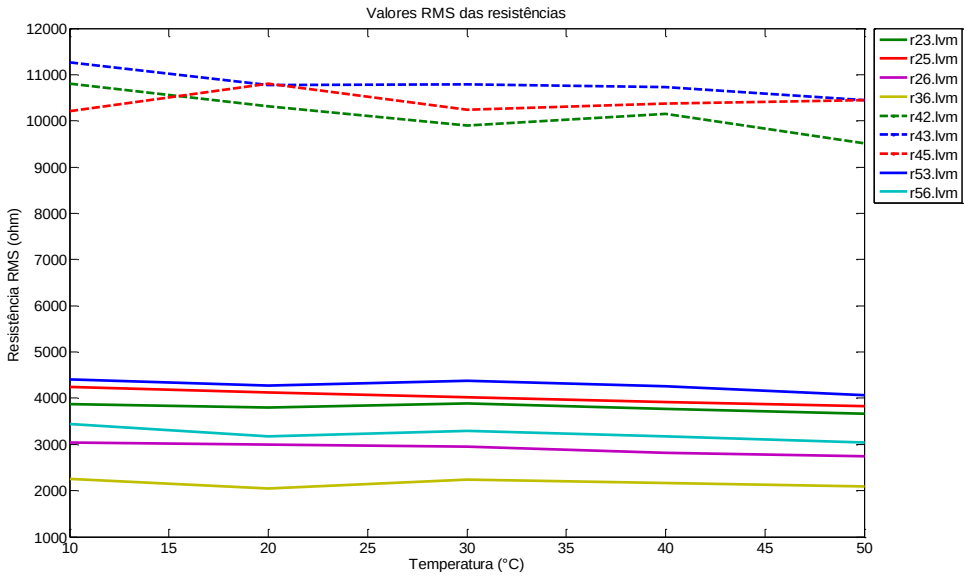
A tabela 17 mostra as variações na resistência com a variação da temperatura e a figura 77 mostra os gráficos dos valores RMS das resistências em função da temperatura para a placa com dano.

Tabela 17 – Comparações entre as resistências da placa D4 com dano variando a temperatura e mantendo a umidade constante.

	10°C p/ 20°C	10°C p/ 30°C	10°C p/ 40°C	10°C p/ 50°C
r12	-8%	-11%	-13%	-13%
r14	-14%	-14%	-13%	277%
r15	-11%	-13%	-10%	306%
r16	-83%	-10%	-11%	371%
r23	-2%	0%	-3%	-5%
r25	-3%	-5%	-8%	-10%
r26	-2%	-3%	-7%	-9%
r36	-9%	0%	-4%	-7%
r42	-4%	-8%	-6%	-12%
r43	-4%	-4%	-5%	-7%
r45	6%	0%	2%	2%
r53	-3%	-1%	-3%	-8%
r56	-8%	-4%	-8%	-11%

Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 77 – Gráfico dos valores RMS pela temperatura da placa D4 com dano.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Um fato inesperado foi observado nas medições variando-se a temperatura: Neste caso não houve o aumento da resistência com o aumento da temperatura como ocorreu nos casos anteriores. Pelo contrário, houve uma leve diminuição nas resistências.

Nota-se pela tabela 16 que todos os valores relacionados ao terminal 1 apresentam valores muito maiores do que os outros valores, no entanto, a maioria das medições indicou um aumento em suas resistências após o dano. Esse fato pode ser melhor observado na tabela 18, o qual mostra as diferenças entre as resistências antes e depois do dano.

Tabela 18 – Comparação entre a placa sem dano e com dano variando a temperatura e mantendo a umidade constante para a placaD4.

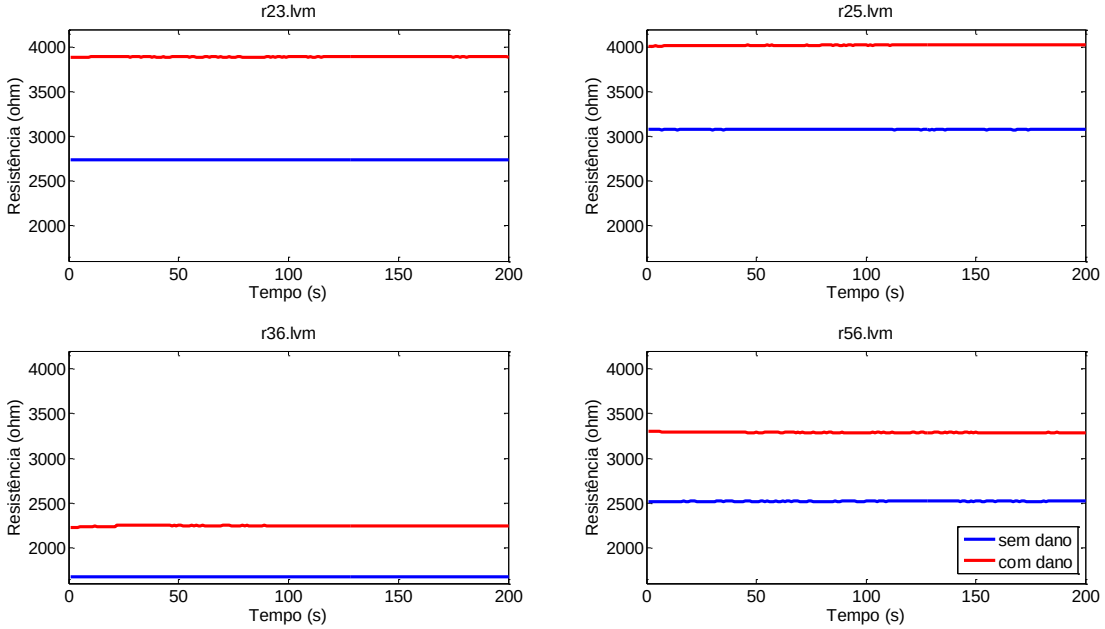
	10°C@70%	20°C@70%	30°C@70%	40°C@70%	50°C@70%
r12	58%	47%	241%	117%	45%
r14	65%	46%	242%	114%	541%
r15	57%	47%	210%	41%	587%
r16	57%	-72%	171%	38%	705%
r23	40%	41%	42%	31%	31%
r25	36%	32%	31%	25%	19%
r26	34%	33%	31%	21%	15%
r36	36%	26%	34%	16%	17%
r42	85%	71%	54%	42%	20%
r43	76%	68%	54%	33%	9%
r45	65%	69%	42%	13%	17%
r53	35%	31%	34%	19%	18%
r56	36%	24%	31%	18%	10%

Fonte: Elaboração do próprio autor

Neste caso os resultados foram conforme o esperado, no qual todas as resistências apresentaram um aumento. Apesar deste fato servir para constatar com maior certeza a presença do dano, no caso da placa D4 a localização do dano não foi realizada, pois não se consegue estabelecer uma resistência a qual pode ser considerada SEM DANO.

Por fim a figura 78 mostra uma comparação dos gráficos antes e depois do dano para a resistência no caminho r23 a 30°C e 70%.

Figura 78 – Comparação das resistências dos caminhos próximos ao dano da placa D4 a 30°C e umidade de 70%.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Nota-se novamente uma grande diferença entre os valores, o que é um indicativo claro do dano. Seguiu-se então para a realização do teste de umidade com a placa D5.

5.2.3 Placa D5

A tabela 19 mostra os resultados obtidos para a placa D5 variando-se a umidade, de 30 a 100%, e mantendo a temperatura constante. Para este caso, optou-se por fixar a temperatura a 25 graus, já que este é um valor frequentemente utilizado como sendo a "temperatura ambiente padrão". O fato de se utilizar a temperatura diferente do experimento com a placa D3 não altera em nada os resultados, já que não é possível realizar uma comparação do valor absoluto entre uma placa e outra, pois cada placa é única, mesmo realizando o mesmo procedimento em todas as vezes.

Tabela 19 – Valores RMS das resistências na placa com dano variando a umidade e mantendo a temperatura constante da placa D5.

	Valores RMS das resistências (Ohms)							
	25°C@30%	**25°C@40%**	**25°C@50%**	**25°C@60%**	**25°C@70%**	**25°C@80%**	**25°C@90%**	**25°C@100%**
r12	2798,2	2852,2	2872,6	2901,7	2862,0	2791,4	2692,6	2550,0
r14	1328,7	1348,5	1345,8	1342,9	1379,5	1349,5	1317,9	1262,6
r15	1587,5	1600,0	1599,6	1590,1	1626,0	1597,9	1561,3	1492,6
r16	5232,7	5146,6	5144,6	5106,5	5039,1	4873,9	4966,8	4737,1
r23	8232,1	7411,8	7341,8	8132,1	7988,1	5614,5	5289,9	4676,3
r25	3011,1	3009,3	2953,6	2987,2	2931,9	2862,8	2767,7	2586,6
r26	6692,4	6708,4	6572,9	6579,7	6401,1	6160,3	5967,7	5846,6
r36	11738,6	12059,3	11721,2	11563,1	11227,0	8710,5	8084,3	7671,2
r42	2988,6	2848,5	2964,7	2958,2	2913,4	2834,6	2736,6	2532,3
r43	6775,2	8001,3	6720,7	8128,0	7817,6	5526,1	5127,1	4542,5
r45	1297,0	1294,7	1292,0	1286,5	1274,2	1260,1	1231,9	1164,4
r53	6667,8	6791,2	8148,8	8022,5	7826,4	5524,8	5032,5	4495,7
r56	4965,8	5103,5	4921,5	4900,7	4725,1	4528,6	4465,0	4328,1

Fonte: Elaboração do próprio autor

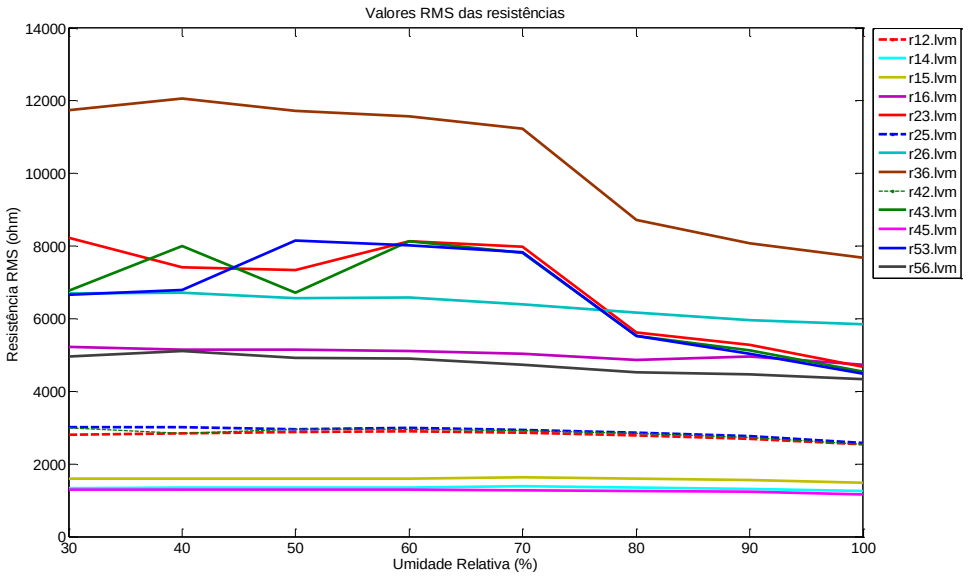
A tabela 20 mostra as comparações entre as diferentes umidades e a figura 79 mostra os gráficos de resistências RMS em função das umidades relativas.

Tabela 20 – Comparação das resistências da placa D5 sem dano variando a umidade e mantendo a temperatura constante.

	30% p/ 40%	**30% p/ 50%**	**30% p/ 60%**	**30% p/ 70%**	**30% p/ 80%**	**30% p/ 90%**	**30% p/ 100%**
r12	2%	3%	4%	2%	0%	-4%	-9%
r14	1%	1%	1%	4%	2%	-1%	-5%
r15	1%	1%	0%	2%	1%	-2%	-6%
r16	-2%	-2%	-2%	-4%	-7%	-5%	-9%
r23	-10%	-11%	-1%	-3%	-32%	-36%	-43%
r25	0%	-2%	-1%	-3%	-5%	-8%	-14%
r26	0%	-2%	-2%	-4%	-8%	-11%	-13%
r36	3%	0%	-1%	-4%	-26%	-31%	-35%
r42	-5%	-1%	-1%	-3%	-5%	-8%	-15%
r43	18%	-1%	20%	15%	-18%	-24%	-33%
r45	0%	0%	-1%	-2%	-3%	-5%	-10%
r53	2%	22%	20%	17%	-17%	-25%	-33%
r56	3%	-1%	-1%	-5%	-9%	-10%	-13%

Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 79 – **Gráfico dos valores RMS pela umidade da placa D5 sem dano.**



Fonte: Elaboração do próprio autor

Avaliando-se a tabela 19 e a figura 79 é possível verificar que realmente conforme se aumenta a umidade relativa as resistências diminuem, no entanto, uma peculiaridade destes resultados deve ser notada. Diferentemente dos resultados anteriores, os resultados da tabela 19 mostram que todos as medições relacionadas ao terminal três acusaram grandes diminuições das resistências a partir de 80%, enquanto que até os 70% houveram oscilações nos valores. Durante o experimento também foi observado que mesmo fixando-se a umidade e esperando por um período de tempo considerável (de 30 a 60 minutos) para que o sistema entrasse em equilíbrio termodinâmico, ocorriam variações consideráveis de resistência. Este fato indicaria que, da mesma forma que nos casos anteriores, poderia haver um mau contato no terminal três, fazendo com que as medições variassem mesmo que todo o sistema estivesse sendo controlado para que não ocorresse nenhuma interferência externa às medições. Esta observação é de grande importância, pois este fato aliado as quedas abruptas de resistência para umidades acima de 80% indicaria que na realidade a umidade tende a reduzir o efeito do aumento da resistência causado pelo mau contato, funcionando como uma ponte entre o terminal de ouro e o fio de cobre, os quais não estariam devidamente ligados e por isso o mal contato.

O próximo passo foi obter as medições após a inserção de um dano. A figura 80 mostra a placa antes e depois do dano e a tabela 22 mostra os valores RMS das resistências. Para este

caso foi inserido um dano entre os terminais 1 e 2 de forma que em cada caso o dano fosse criado em um local diferente.

Figura 80 – Placa antes do dano e depois do dano (D5).



Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 21 – Valores RMS das resistências na placa D5 com dano variando a umidade.

	Valores RMS das resistências (Ohms)							
	25°C@30%	**25°C@40%**	**25°C@50%**	**25°C@60%**	**25°C@70%**	**25°C@80%**	**25°C@90%**	**25°C@100%**
r12	3996,0	3791,6	3741,4	3733,1	3748,1	3705,5	3573,7	3188,1
r14	1663,4	1660,1	1646,1	1617,7	1586,6	1543,1	1489,2	1408,7
r15	1976,0	1956,4	1941,5	1913,9	1874,6	1829,1	1769,7	1668,0
r16	6487,4	6002,5	6060,9	5867,5	5741,3	5563,8	5314,8	5090,7
r23	6884,0	6777,8	6729,5	6480,8	6282,3	5929,7	5476,8	4855,1
r25	4050,4	4030,5	3945,8	3840,0	3752,0	3620,7	3373,4	3220,7
r26	7990,1	7777,2	7934,3	7836,0	7528,8	7312,0	6951,3	6561,7
r36	11662,0	10947,0	10780,0	10550,8	10120,3	9684,9	9141,4	8313,9
r42	3288,1	3197,3	3478,0	3195,1	3236,6	3285,8	3046,1	2836,0
r43	6479,7	6550,5	6427,1	6310,4	6181,2	5898,5	5184,7	4766,9
r45	1360,5	1350,6	1348,6	1334,9	1318,1	1294,1	1257,6	1202,6
r53	6528,7	6529,5	6467,2	6386,9	6135,9	5777,3	5133,2	4640,7
r56	5765,6	5347,8	5336,2	5257,3	5083,7	4994,8	4758,7	4473,5

Fonte: Elaboração do próprio autor

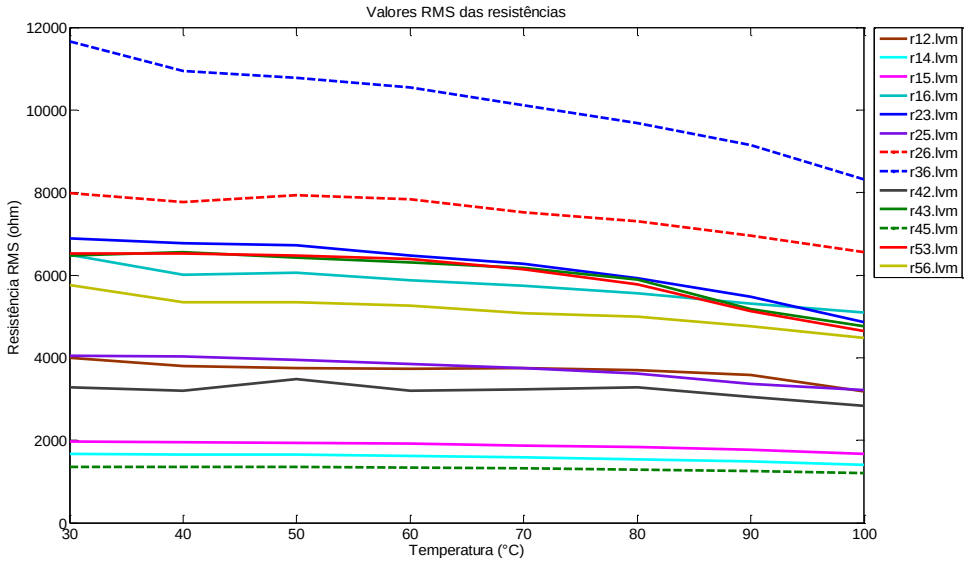
A tabela 22 mostra as variações na resistência com a variação da umidade e a figura 81 mostra os gráficos dos valores RMS para a placa com dano em função da umidade.

Tabela 22 – Comparações entre as resistências da placa D5 com dano variando a umidade e mantendo a umidade constante.

	30% p/ 40%	30% p/ 50%	30% p/ 60%	30% p/ 70%	30% p/ 80%	30% p/ 90%	30% p/ 100%
r12	-5%	-6%	-7%	-6%	-7%	-11%	-20%
r14	0%	-1%	-3%	-5%	-7%	-10%	-15%
r15	-1%	-2%	-3%	-5%	-7%	-10%	-16%
r16	-7%	-7%	-10%	-12%	-14%	-18%	-22%
r23	-2%	-2%	-6%	-9%	-14%	-20%	-29%
r25	0%	-3%	-5%	-7%	-11%	-17%	-20%
r26	-3%	-1%	-2%	-6%	-8%	-13%	-18%
r36	-6%	-8%	-10%	-13%	-17%	-22%	-29%
r42	-3%	6%	-3%	-2%	0%	-7%	-14%
r43	1%	-1%	-3%	-5%	-9%	-20%	-26%
r45	-1%	-1%	-2%	-3%	-5%	-8%	-12%
r53	0%	-1%	-2%	-6%	-12%	-21%	-29%
r56	-7%	-7%	-9%	-12%	-13%	-17%	-22%

Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 81 – Gráfico dos valores RMS para variação na umidade da placa D5 com dano.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Pode-se notar através da tabela 22 e da figura 81 que neste caso ouve uma variação mais uniforme das resistências, sendo que todas as medições apresentaram decréscimos quando se

aumenta a umidade. Apesar disto, as medições relacionadas ao terminal três ainda apresentam variações relativamente mais altas, mostrando que existe uma maior influência da umidade neste terminal.

A tabela 23 mostra a variação dos valores RMS para a placa com dano e sem dano.

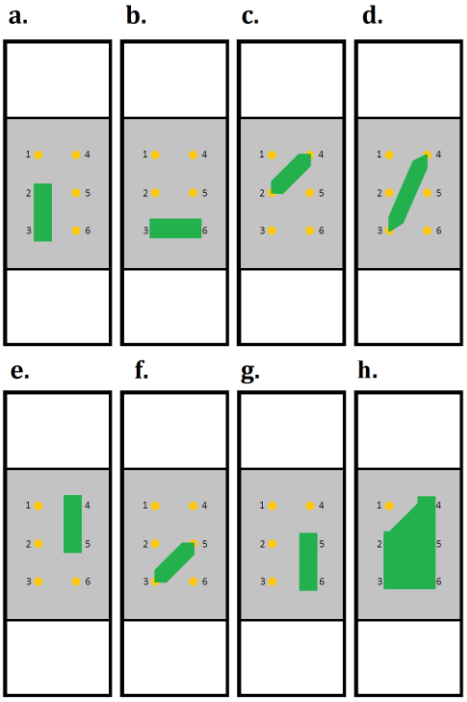
Tabela 23 – Comparação da placa D5 sem dano e com dano variando a umidade e mantendo a temperatura constante (D5).

	25°C@20%	25°C@30%	25°C@40%	25°C@50%	25°C@60%	25°C@70%	25°C@80%	25°C@90%
r12	43%	33%	30%	29%	31%	33%	33%	25%
r14	25%	23%	22%	20%	15%	14%	13%	12%
r15	24%	22%	21%	20%	15%	14%	13%	12%
r16	24%	17%	18%	15%	14%	14%	7%	7%
r23	-16%	-9%	-8%	-20%	-21%	6%	4%	4%
r25	35%	34%	34%	29%	28%	26%	22%	25%
r26	19%	16%	21%	19%	18%	19%	16%	12%
r36	-1%	-9%	-8%	-9%	-10%	11%	13%	8%
r42	10%	12%	17%	8%	11%	16%	11%	12%
r43	-4%	-18%	-4%	-22%	-21%	7%	1%	5%
r45	5%	4%	4%	4%	3%	3%	2%	3%
r53	-2%	-4%	-21%	-20%	-22%	5%	2%	3%
r56	16%	5%	8%	7%	8%	10%	7%	3%

Fonte: Elaboração do próprio autor

Realizando novamente a análise das regiões sem dano obtém-se a figura 82.

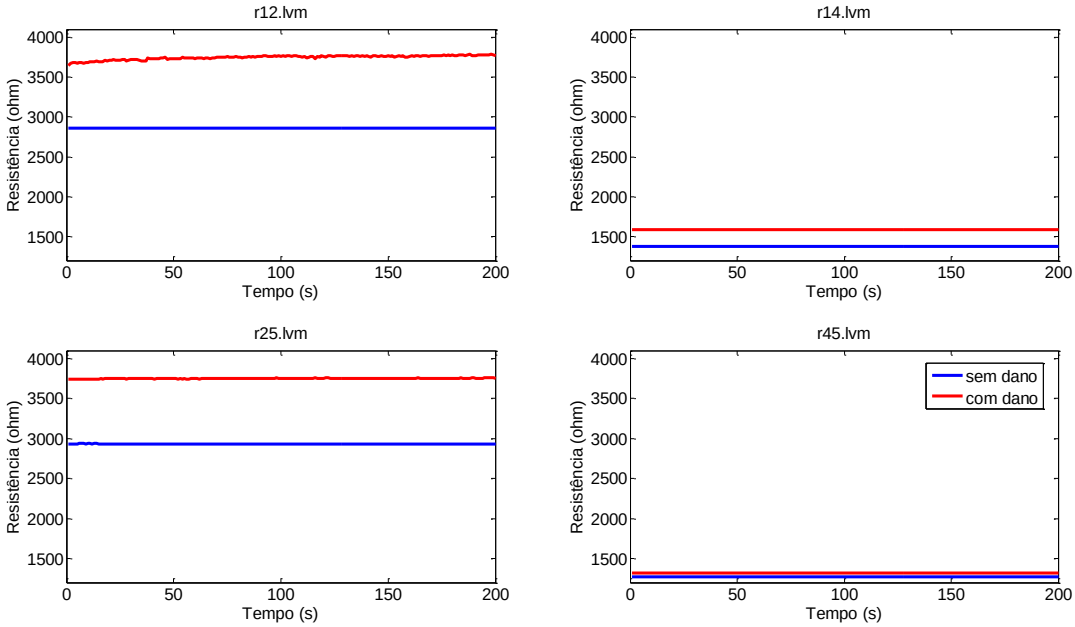
Figura 82 – Análise dos locais livres de danos (D5).



Fonte: Elaboração do próprio autor

Para este caso nota-se que a placa já apresentava uma maior consistência nas medições desde o começo. Desta forma, a verificação da influência da umidade foi facilitada e também foi possível a constatação do mau contato e da sua influência nas medições. Além disso, foi possível também uma melhor localização do dano, já que com a análise dos locais sem dano, a região que possivelmente existiria um dano ficou reduzida a somente a área próxima ao terminal um. No entanto, verificando-se as medições com as maiores alterações, pode-se afirmar que existe uma grande possibilidade de que o dano esteja entre o terminal um e dois, pois foi a medição que apresentou a maior alteração. Finalmente a figura 83 mostra a comparação dos gráficos da resistência para o caminho r12 antes e depois do dano, para 25°C e 70% de umidade. Novamente se verifica a grande variação nos valores da resistência e indicação clara da ocorrência do dano.

Figura 83 – Comparação das resistências dos caminhos próximos ao dano da placa D5 a 30°C e umidade de 70%.



Fonte: Elaboração do próprio autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E ETAPAS FUTURAS

6.1 Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho confirmaram a possibilidade de se utilizar os nanocompósitos de ITO/PMMA para se detectar danos em estruturas de alumínio. O principal obstáculo encontrado foi o fato de tanto o procedimento de produção dos sensores em escalas maiores em grandes quantidades, quanto o procedimento de preparação, instrumentação e medição dos sinais usando este tipo de sensor em específico ainda estarem nos estágios iniciais de desenvolvimento. Apesar disto, durante o desenvolvimento deste projeto foram obtidos diversos avanços em ambas as áreas, de forma que, apesar dos resultados ainda apresentarem imperfeições, o objetivo do projeto foi atendido, pois o sensor foi capaz de realizar a primeira e mais importante fase do SHM, que é a detecção do dano, além de ser capaz de, com certas limitações, determinar a localização do dano.

Duas grandes descobertas obtidas neste trabalho podem ser destacadas: a observação de como uma placa revestida se comporta durante a realização de um ensaio de tração; e o comportamento deste tipo de sensor quando submetido a variações de temperatura e umidade.

No caso do ensaio de tração observou-se que o sensor não reage às trações até o ponto em que se inicia a deformação plástica do material base (placa de alumínio). Além disso, notou-se também que em todos os casos em que foi possível detectar alguma variação na resistência, houve o desacoplamento dos fios de cobre com os terminais de ouro, sendo que isso ocorria mesmo que o sensor em si não era danificado. Esse fato mostra que melhorias devem ser feitas no sentido de tentar manter os fios colados mesmo havendo deformações no sensor.

Já no caso da temperatura e umidade, os sensores não apresentaram grandes variações com relação a temperatura. No entanto, com temperaturas acima de 30°C a comparação das resistências antes e depois do dano se torna mais complicada, pois a variação causada pela temperatura é maior, tornando a localização do dano mais complicada. No caso da umidade verificou-se que as medições se tornam mais instáveis com variações de umidade, podendo tornar a detecção do dano um pouco mais complicada. Neste caso é necessário fazer um isolamento do sensor, ou aplicar técnicas capazes de distinguir estes dois efeitos, lembrando que a variação dos valores causados pelo dano é mais intensa. Apesar disto foi verificado que ocorre uma queda brusca na resistência quando a umidade atinge o valor de 100%.

Em geral os resultados obtidos neste trabalho foram satisfatórios, pois o sensor foi capaz de efetivamente detectar o dano, no entanto a localização do dano ainda é deficiente, e necessita de maiores estudos a respeito, principalmente com relação a influência da temperatura e da umidade. Apesar dos obstáculos a serem contornados, o sensor de ITO/PMMA mostrou-se promissor na detecção e localização de danos estruturais em placas de alumínio.

6.2 Proposta Para Trabalhos Futuros

- Desenvolver um método que seja mais prático e menos suscetível a variações durante a aplicação do sensor à placa;
- Desenvolver um método que possa ser aplicado em qualquer geometria de superfície;
- Melhorar o método a qual se fixa os fios utilizados para acoplar os sistemas de aquisição;
- Melhorar o sistema de instrumentação utilizado para aquisição de danos, de forma a se conseguir alternar os pontos de medição sem riscos de causar interferências significativas nas medições;
- Desenvolver um meio para isolar o sistema de influências ambientais;
- Caso não se consiga evitar as influências da temperatura e umidade, aplicar métodos de inteligência artificial como RNAs, ou aprendizado de máquinas para distinguir estas variações, melhorando assim a capacidade de detecção e localização do dano;
- Repetir os testes para materiais compósitos. Acredita-se que com este tipo de material as dificuldades sejam menores, pois o material base não é um condutor, como no caso do alumíno.

REFERÊNCIAS

ABOT, J. L. et al. Delamination detection with carbon nanotube thread in self-sensing composite materials. **Composites Science and Technology**, Kidlington**,** v. 70, n. 7, p. 1113-1119, 2010.

ALLEN, G. Materials chemistry: an overview. **Journal of Materials Chemistry**, Cambridge**,** v. 1, n. 1, p. 1-3, 1991.

ARLINDO, E. P. S. et al. Electrical and Optical Properties of Conductive and Transparent ITO@PMMA Nanocomposites. **The Journal of Physical Chemistry C**, Washington**,** v. 116, n. 23, p. 12946-12952, 2012.

ASHRAFI, B. et al. Single-walled carbon nanotube–modified epoxy thin films for continuous crack monitoring of metallic structures. **Structural Health Monitoring**, London**,** v. 11, n. 5, p. 589-601, 2012.

BOLLER, C.; STASZEWSKI, W. J. Aircraft Structural Health and Usage Monitoring. In: STASZEWSKI, W. J.;BOLLER, C. et al. (Ed.). **Health Monitoring of Aerospace Structures: smat sensor technologies and signal processing**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2004. p.29-73.

CARREÑO, N. V. et al. Carbon-coated SnO2 nanobelts and nanoparticles by single catalytic step. **Journal of Nanoparticle Research**, Dordrecht**,** v. 11, n. 4, p. 955-963, 2009.

DAWAR, A. L.; JOSHI, J. C. Semiconducting transparent thin films: their properties and applications. **Journal of Materials Science**, New York**,** v. 19, n. 1, p. 1-23, 1984.

DESAI, A. V.; HAQUE, M. A. Mechanical properties of ZnO nanowires. **Sensors and Actuators A: Physical**, Washington**,** v. 134, n. 1, p. 169-176, 2007.

DIAS, L. A. M.; MACHADO, L.; KOURY, R. **Carta psicrométrica.** 2005. Disponível em: < www.demec.ufmg.br/grupos/refrigera/>. Acesso em: 24 jul.2014.

FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BEMENT, M. T. An introduction to damage prognosis. In: INMAN, D. J. E. A. (Ed.). **Damage prognosis:** for aerospace, civil and mechanical systems. West Sussex: John Wiley & Sons, 2005. p.1-12.

FRANÇA, A. A. **Detecção e localização de danos em materiais compósitos aplicado em aeronaves utilizando redes neurais artificiais**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

GIBSON, R. F. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures. **Composite Structures**, London**,** v. 92, n. 12, p. 2793-2810, 2010.

GONSALEZ, C. G. **Metodologias para reconhecimento de padrões em sistemas SHM utilizando a técnica da Impedância Eletromecânica (E/M)**. 2012. 117 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

HAMBERG, I.; GRANQVIST, C. G. Evaporated Sn‐doped In2O3 films: basic optical properties and applications to energy‐efficient windows. **Journal of Applied Physics**, Washington**,** v. 60, n. 11, p. R123-R160, 1986.

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

KANG, I. et al. A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring. **Smart Materials and Structures**, Bristol**,** v. 15, n. 3, p. 737, 2006.

KOO, K.-Y. et al. Automated impedance-based structural health monitoring incorporating effective frequency shift for compensating temperature effects. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster**,** v. 20, n. 4, p. 367-377, 2009.

LEE, J. W. et al. Health monitoring method for plate structures using continuous sensors and neural network analysis. SMART STRUCTURES AND MATERIALS 2006: SENSORS AND SMART STRUCTURES TECHNOLOGIES FOR CIVIL, MECHANICAL, AND AEROSPACE SYSTEMS, 2006, San Diego. **Proceedings of the...** San Diego: SPIE, 2006, p.61741R-61741R. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.658099>. Acesso em: 15 dez. 2014.

LEGNANI, C. **Propriedades de filmes finos de óxido de índio - estanho produzidos por "pulverização catódica com rádiofreqüência assistida por um campo magnético constante**. 2002. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2002.

LIU, Y. et al. Autonomous sensing of composites with carbon nanotubes for structural health monitoring. BEHAVIOR AND MECHANICS OF MULTIFUNCTIONAL MATERIALS AND COMPOSITES, 2012, San Diego. **Proceedings of the...** San Diego: SPIE, 2012, p.83421H-83421H. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.915467>. Acesso em: 12 dez. 2014.

LOPES JÚNIOR, V.; SILVA, S. D. Structural health monitoring algorithms for smart structures. In: INMAN, D. J. E. A. (Ed.). **Damage prognosis:** for aerospace, civil and mechanical systems. West Sussex: John Wiley & Sons, 2005. p.177-199.

MAKSIMENKO, I. et al. Conductivity and adhesion enhancement in low-temperature processed indium tin oxide/polymer nanocomposites. **Thin Solid Films**, Amsterdam**,** v. 518, n. 10, p. 2910-2915, 2010.

MANIFACIER, J. C. Thin metallic oxides as transparent conductors. **Thin Solid Films**, Amsterdam**,** v. 90, n. 3, p. 297-308, 1982.

MARTINS, M. A.; TRINDADE, T. Os nanomateriais e a descoberta de novos mundos na bancada do químico. **Química Nova**, São Paulo**,** v. 35, p. 1434-1446, 2012.

NIROUMAND, H.; ZAIN, M. F. M. The Role of nanomaterials in nanoarchitecture. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, Amsterdam**,** v. 89, p. 27-30, 2013.

ORLANDI, M. O. et al. Tin-doped indium oxide nanobelts grown by carbothermal reduction method. **Applied Physics A**, Washington**,** v. 80, n. 1, p. 23-25, 2005.

ORLANDI, M. O. et al. Growth of SnO nanobelts and dendrites by a self-catalytic VLS process. **The Journal of Physical Chemistry B**, Washington**,** v. 110, n. 13, p. 6621-6625, 2006.

PARK, G. et al. Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications. **JSME International Journal Series A**, Tokyo**,** v. 42, n. 2, p. 249-258, 1999.

RAINIERI, C. et al. CNT compostes for SHM: a literature review. **International Workshop: Smart materials, structures & NDT in Aerospace**, 2011.

RAMS, J. et al. Use of carbon nanotubes for strain and damage sensing of epoxy-based composites. **International Journal of Smart and Nano Materials**, Abingdon**,** v. 3, n. 2, p. 152-161, 2012.

REZENDE, M. C. Fractografia de compósitos estruturais. **Polímeros**, São Carlos**,** v. 17, p. E4-E11, 2007.

SCHULZ, M. J. et al. Neural system for structural health monitoring. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS 2001: SENSORY PHENOMENA AND MEASUREMENT INSTRUMENTATION FOR SMART STRUCTURES AND MATERIALS, 2001, Newport Beach. **Proceedings of the...** Newport Beach: SPIE, 2001, p.130-141. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.435516>. Acesso em: 12 nov. 2014.

SEBASTIAN, J. et al. Health monitoring of structural composites with embedded carbon nanotube coated glass fiber sensors. **Carbon**, Kidlington**,** v. 66, p. 191-200, 2014.

TAHAR, R. B. H. et al. Tin doped indium oxide thin films: electrical properties. **Journal of Applied Physics**, Washington**,** v. 83, n. 5, p. 2631-2645, 1998.

THANASANVORAKUN, S. et al. Characterization of SnO2 nanowires synthesized from SnO by carbothermal reduction process. **Ceramics International**, Kidlington**,** v. 34, n. 4, p. 1127-1130, 2008.

WERNIK, J. M.; MEGUID, S. A. Recent developments in multifunctional nanocomposites using carbon nanotubes. **Applied Mechanics Reviews**, New York**,** v. 63, n. 5, p. 050801, 2010.

WINEY, K. I.; VAIA, R. A. Polymer nanocomposites. **MRS Bulletin**, New York**,** v. 32, n. 4, p. 314-322, 2007.

YANG, J. et al. The compensation technique of tensile force effect on the electromechanical impedance method for structural health monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems**

and Structures, 2015. Disponível em: < http://jim.sagepub.com/content/early/2015/01/29/1045389X14568879.full.pdf+html>. Acesso em: 16 mar. 2015.

YUN, Y.-H. et al. Multifunctional carbon nanofiber/nanotube smart materials. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS 2005: SMART ELECTRONICS, MEMS, BIOMEMS, AND NANOTECHNOLOGY, 2005, San Diego. **Proceedings of the...** San Diego: SPIE, 2005, p.184-195. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.600276>. Acesso em: 12 jan. 2015.

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

ZHOU, Z. et al. Smart film for crack monitoring of concrete bridges. **Structural Health Monitoring**, London**,** v. 10, n. 3, p. 275-289, 2011.