Isabel Giron Camerini

**Qualificação de diferentes procedimentos de
instrumentação de sensores de deformação
baseados em redes de Bragg**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Arthur Martins Barbosa Braga
Coorientador: Sully Mejia Milena Quintero

Rio de Janeiro

Julho de 2017

AGRADECIMENTO

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, porque, se hoje concluo o curso de graduação em engenharia mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, certamente isso estava em seus planos.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador, professor e Coordenador de Engenharia do Petróleo na PUC-Rio, Arthur Braga, pois toda a sua ajuda e ensinamentos foram necessários, não apenas para a conclusão deste trabalho, mas também para a minha vida profissional.

À minha coorientadora e chefe Sully Quintero, por toda a atenção dada nesse 1 ano em que estou no LSFO. Por toda ajuda, apoio e incentivo para este trabalho e, também, por ser um exemplo de profissional para mim.

Ao meu pai, Claudio Camerini, por ser meu maior exemplo de profissional e engenheiro e por me mostrar que se você fizer algo por amar e gostar, esse feito será muito melhor executado. À minha mãe, Cristina, por ser meu exemplo de mulher, de calma e de amor.

À minha vó (nonna) Esther, pois esteve presente comigo por 22 anos, cuidando de mim como mãe. Seu amor, ensinamentos e empoderamento estarão comigo para sempre.

À minha irmã Flavia, por ser além de irmã, ser minha melhor amiga. Aos meus irmãos Cesar e Murilo, por todo apoio e dúvidas tiradas sobre: engenharia, futuro e vida, além de todo o amor compartilhado. Ao meu sobrinho Lucas, pois mesmo tão pequeno e com pouco tempo no mundo, conseguiu me mostrar um novo tipo de amor. Ao meu namorado Raphael, por transformar todo o meu estresse em calma.

Aos meus amigos de faculdade, Camilla Paixão, Gustavo Lemos, Lucas Silva, e tantos outros, por estarem comigo, do início ao fim, compartilhando esse estresse diário que se chama graduação em engenharia mecânica.

Aos meus amigos de LSFO, em especial à Gabriela Wegmann e Sávio Figueiredo, por toda ajuda e parceria neste projeto.

Resumo

Qualificação de diferentes procedimentos de instrumentação de sensores de deformação baseados em redes de Bragg.

O desempenho dos sensores de deformação a fibra óptica baseados em rede de Bragg depende fortemente da escolha adequada do adesivo e do procedimento de instrumentação.

O objetivo do projeto é testar e qualificar, tipos de instrumentações para dois tipos distintos de adesivos de alta performance. Foram testados 3 tipos de modos de adesão do sensor ao corpo de prova: livre de força durante a cura, com aplicação de pressão por ímã e com aplicação de pressão por um parafuso micrométrico projetado especialmente para a aplicação neste trabalho. As instrumentações assim obtidas foram testadas em relação a temperatura, tensão e presença de umidade no ambiente.

Os resultados permitem apontar qual a melhor instrumentação para cada adesivo e suas limitações de uso.

Palavras chaves: Rede de Bragg, Sensor de deformação de fibra óptica, adesivos, instrumentação, carga, temperatura.

Abstract

Evaluation of high performance adhesives for optical fiber Bragg grating sensors.

The performance of optical fiber Bragg grating strain sensors depend on the choice of adhesive and on the instrumentation procedure.

This final project treats of an evaluation of high performance adhesives for optical fiber Bragg grating sensors. The objective is to test two different adhesives instrumented in different way of cure, with temperature and without temperature, and three different way pressure application: pressure with magnetic, pressure with piston micrometric and no pressure applied.

After the instrumented, all specimens were tested with different temperatures, loads and humidity.

The results compared to appointing the best evaluation for the two adhesives and its limitations of use.

Keywords: Optical fiber sensors; fiber Bragg grating sensors; adhesives, temperature; load; humidity.

Lista de figuras

Figura 1.1- Exemplo práticos do sensoriamento com redes de Bragg. (a) Apresenta um duto com defeito estrutural. (b) Exemplo prático dos sensores de Bragg em um riser, aonde em cada arame é fixado um sensor.....	2
Figura 2.1 - Camadas da Fibra óptica.	4
Figura 2.2 - Representação da fibra óptica tipo monomodo.	6
Figura 2.3 - Representação fibra óptica multimodo com índice degrau.	6
Figura 2.4 - Representação fibra óptica multimodo com índice degrau.	7
Figura 2.5 - Representação do funcionamento de uma rede de Bragg inserida em uma fibra óptica.	9
Figura 3.1. Modelo esquemático do sistema interferométrico para fabricação de redes de Bragg.	12
Figura 3.2. Espectro de reflexão típico de uma rede de Bragg.....	12
Figura 3.3. Dimensões do corpo de prova.....	13
Figura 3.4. Corpos de prova antes e depois de serem lixados e limpos.	15
Figura 3.5. Corpo de prova com fita de poliamida fixando o sensor para a preparação da colagem.	15
Figura 3.6. Procedimento de aplicação do adesivo.	16
Figura 3.7. Sistema para colocar pressão. (a) Por parafuso micrométrico. (b) Por ímã.....	16
Figura 3.8. Corpos de prova finalizados para as 3 instrumentações.	17
Figura 3.9. Interrogador óptico Micron Optics 125 sm.	19
Figura 3.10. Câmara de temperatura Vötsch VCL 4010.	19
Figura 3.11. (a) Máquina universal Instron Electroplus E10000 com uma câmara de temperatura acoplada. [1] Máquina de tração; [2] câmara de temperatura controlada; [3] unidade de controle e registro. (b) Visão detalhada dentro da câmara de temperatura. [4] local de inserção do corpo de prova.	20
Figura 3.12. Curva típica de resposta do ensaio de temperatura.	22
Figura 3.13. Curva típica de resposta do ensaio de tração.	23
Figura 3.14. Curva típica de resposta do teste com umidade.	24
Figura 4.1. Teste de temperatura. (a) Corpos de prova curados com temperatura. (b) Corpos de prova curados sem temperatura.	25

Figura 4.2. Corpos de prova danificados pós o teste de temperatura. (a) CP 03 com sinais de ferrugem. (b) CP 01 com descolamento de sensor.....	27
Figura 4.3. Teste de tração a 110 °C. (a) Curados com temperatura. (b) Curado sem temperatura.....	28
Figura 4.4. CP 11, em evidência o sensor 2 instrumentado de forma desalinhada.	29
Figura 4.5. Fotos do CP 28 pelo microscópio. (a) Em evidência o sensor descolado. (b) Início do sensor e bolhas no instrumentado do adesivo.....	30
Figura 4.6. Teste de tração a 150 °C. (a) Curados com temperatura. (b) Curado sem temperatura.....	31
Figura 4.7. Histerese do teste de tração.....	33
Figura 4.8. Teste de temperatura. (a) Corpos de prova curados com temperatura. (b) Corpos de prova curados sem temperatura.	34
Figura 4.9. Teste de tração a 70 °C. (a) Curados com temperatura. (b) Curado sem temperatura.....	36
Figura 4.10. Espectro do corpo de prova CP 19. (a) Antes do teste de carga. (b) Depois do teste de carga.	37
Figura 4.11. Teste de tração a 90 °C. (a) Curados com temperatura. (b) Curado sem temperatura.....	38
Figura 4.12. Histerese do teste de tração.....	39

Lista de tabelas

Tabela 3-1-Propriedade dos adesivos selecionados para testes.....	11
Tabela 3-2-Propriedades dos sensores.....	13
Tabela 3-3-Propriedades dos CPs.	18
Tabela 3-4- Testes efetuados	21
Tabela 4-1- Dados da histerese para o teste de temperatura do adesivo 1.....	26
Tabela 4-2-Dados da histerese para os testes de tração a 110 °C para o adesivo 1.....	29
Tabela 4-3-Dados da histerese para o teste de tração a 150°C para o adesivo 1.	32
Tabela 4-4- Dados do teste de temperatura com 80% de umidade.....	33
Tabela 4-5- Dados da histerese para o teste de tração a 110 °C para o adesivo 1, antes e depois do teste de umidade.....	34
Tabela 4-6- Dados da histerese para o teste de temperatura do adesivo 2.....	35
Tabela 4-7- Dados da histerese para o teste de tração a 70 °C para o adesivo 2.	36
Tabela 4-8-Dados da histerese para o teste de tração a 90 °C para o adesivo 2.	38
Tabela 4-9-Dados do teste de temperatura com 80% de umidade.....	39
Tabela 4-10-Dados da histerese para o teste de tração a 70 °C para o adesivo 2, antes e depois do teste de umidade.....	40

Sumário

1 . Introdução	1
1.1. Objetivo Geral	2
1.2. Objetivos Específicos	3
2 . Conceitos básicos	4
2.1. Fibra óptica	4
2.1.1. Tipos de fibra ópticas	5
2.2. Sensores de deformação e temperatura em fibra óptica	7
2.2.1. Sensores Distribuídos	8
2.2.2. Sensores de deformação pontuais.	8
3 . Metodologia	11
3.1. Materiais	11
3.1.1. Adesivos Epóxi	11
3.1.2. Sensores de deformação a fibra óptica baseados em redes de Bragg	11
3.1.3. Corpos de prova	13
3.2. Instrumentação dos sensores de deformação	14
3.3. Bancada experimental	18
3.4. Descrição dos testes de caracterização	21
3.4.1. Planejamento dos testes:	21
4 . Análises e Resultados	25
4.1. Adesivo 1	25
4.1.1. Teste 1- Avaliação de temperatura.	25
4.1.2. Teste de tração	28
4.1.3. Teste com umidade	32
4.2. Adesivo 2	34
4.2.1. Teste de temperatura	34
4.2.2. Teste de carga	35
4.2.3. Teste com umidade	39

5 . Conclusões	41
6 . Referências	42

1. Introdução

A ideia de transmitir dados pela luz surgiu em 1870 pelo físico John Tyndall. Porém a viabilidade desta ideia ocorreu apenas na década de 70 do século passado, com o surgimento da fibra óptica para a substituição de cabos coaxiais de cobre utilizados para a transmissão de sinais na área de telecomunicações.

A fibra óptica em relação aos cabos coaxiais de cobre apresenta diversas vantagens, como o fato de ter pequenas dimensões; ser leve; possuir alta banda de transmissão e longo alcance o que permite maior quantidade de dados possam ser enviados ao mesmo tempo.

Estas vantagens favoreceram para a fibra óptica se inserir bem em outras funções tais como a área de sensoriamento de grandezas físicas, no qual vem ganhando cada vez mais espaço. Dentre os diversos sensores a fibra óptica que hoje são comercializados destacassem dois tipos de sensores, os sensores distribuídos baseados em efeitos não lineares e os sensores pontais baseados em redes de Bragg.

Por exemplo, uma aplicação bem-sucedida de sensores de deformação a fibra óptica com foi desenvolvida no departamento de Mecânica da PUC-Rio. O Laboratório de Sensores de Fibra Óptica (LSFO), em parceria com a empresa Ouro Negro e a Petrobras, desenvolveu um sistema de monitoramento de riser flexíveis usando sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg. Hoje tem cerca de 200 risers flexíveis já instrumentados com este sistema na bacia de Santos. Contudo, existem algumas questões em estudo respeito o desempenho dos sensores a altas temperaturas. O sistema hoje instrumentado tem uma temperatura máxima de 70 °C porém existe um grande interesse de aumentar a temperatura máxima até 120 °C.

A figura 1.1 (a) apresenta ver um duto defeituoso após a interferência da maré, para estes casos os sensores de fibra óptica pontuais baseados em redes de Bragg são utilizados para a monitoração de tensão em arames

de risers flexíveis em óleo dutos marítimos, como exemplificado na figura 1.1(b).

Figura 1.1- Exemplo práticos do sensoriamento com redes de Bragg. (a) Apresenta um duto com defeito estrutural. (b) Exemplo prático dos sensores de Bragg em um riser, aonde em cada arame é fixado um sensor.

Neste projeto de conclusão de curso serão estudados dois tipos de adesivos de alta performance para instrumentar sensores de deformação em fibra óptica baseados em redes de Bragg, bem como dois métodos de cura e três métodos de aplicação. Pretendendo-se com isto, definir alternativas de adesão dos sensores de Bragg às estruturas a serem monitoradas, melhorando o desempenho deste tipo de instrumentação, tentando assim, aumentar a temperatura de operação.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal é avaliar o desempenho de sensores de deformação baseados em rede de Bragg em função do adesivo, cura e da técnica de instrumentação utilizada.

1.2.Objetivos Específicos

1. Avaliar o desempenho de sensor de deformação a fibras ópticas baseados em redes de Bragg em função de 2 adesivos epóxi de alto desempenho
2. Avaliar o desempenho do sensor de deformação a fibras ópticas baseados em redes de Bragg em função do método de aplicação, sendo realizadas de 2 formas distintas, com pressão e sem pressão.

2. Conceitos básicos

2.1. Fibra óptica

Fibra óptica é basicamente um filamento de plástico ou vidro, que tem grande capacidade de transmitir luz. Ela é minimamente composta por 3 partes, o núcleo que é a região central aonde o sinal é transmitido, a casca que serve para garantir que o feixe de esteja confinado principalmente no núcleo e a terceira que seria uma capa protetora, que da resistência mecânica e protege a fibra de eventuais danos mecânicos. A Figura 2.1 mostra o diagrama esquemático:

Figura 2.1 - Camadas da Fibra óptica.

Especificamente, o processo de confinamento da luz no núcleo da fibra óptica está relacionado com refração. A refração é o fenômeno que ocorre quando um raio de luz cruza a fronteira entre dois meios diferentes sofrendo uma variação na velocidade e na direção de propagação da luz. A grandeza que define esta característica de um meio é o índice de refração. O índice de refração de um meio se define como a razão entre a velocidade da onda luminosa no vácuo (C) e a velocidade da onda luminosa propagada no meio (V).

Os parâmetros utilizados no projeto de fibras ópticas são os índices de refração. É por isso que se diz que a casca serve para manter a transmissão do sinal no núcleo. Isso acontece porque o núcleo tem um

índice de refração ligeiramente maior que o da casca. A seguir é utilizada a lei de Snell para explicar o mecanismo de transmissão na fibra.

A Lei de Snell é matematicamente representada pela equação 2.1:

$$n \cdot \sin \theta = \text{constante} \quad (2.1-a)$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.1-b)$$

Onde n é o índice de refração.

Para a transição da luz de um meio com maior índice de refração para um com menor índice, parte do feixe de luz é refletida e outra parte refratada, no caso da fibra óptica, se quer que toda a luz seja refletida e permaneça dentro do núcleo, para isso existe um ângulo crítico, que segue a equação 2.2:

$$\sin \theta_c < n_2/n_1 \quad (2.2)$$

Que mostra que ângulos menores que o produto do menor índice de refração com o maior índice de refração serão refratados, então feixes com ângulos maiores que o ângulo crítico, terão sua reflexão total, fazendo assim com que o sinal permaneça no núcleo da fibra óptica.

Para a variação do índice de refração na fibra óptica, as fibras são hidrogenadas e podem possuir em sua composição dopantes e co-dopantes, como por exemplo nas fibras ópticas dotadas de rede de Bragg, a fibra é dopada com alta concentração de germânio e co-dopadas com boro.

2.1.1. Tipos de fibra ópticas

Existem tipos diferentes de fibras com diferentes características construtivas, aqui serão descritas as principais:

Monomodo

Dotada de um núcleo muito fino, na ordem de 8 μm , possibilita ter apenas um único modo de propagação, ou seja, o feixe de luz só consegue percorrer um único caminho, diminuindo assim a dispersão de propagação.

Possui um índice de refração degrau, como mostrado na figura 2.2 a variação entre os índices de refração casca-núcleo sofre uma variação abrupta, fazendo com que o sinal tenha um degrau na refração.

Com este núcleo com dimensões pequenas, a fibra monomodo é utilizada em comunicações de média e longas distâncias, tendo aplicações de mais de 50 km.

Figura 2.2 - Representação da fibra óptica tipo monomodo.

Multimodo

As fibras ópticas multimodo por terem um núcleo na ordem de 50 μm podem ter diferentes modos de propagação, por isso possuem diferença nos índices de refração, pois implica na existência de vários feixes de luz incidindo. Esse tipo de fibra tem maior dispersão do sinal, fazendo com que tenha uma aplicação para menores distâncias, porém sua fabricação é mais simples que a monomodo, tornando-a mais barata.

- Multimodo-Degrau: possui índice de refração degrau, que torna uma variação abrupta do sinal, e no caso das multimodos por possuir um núcleo maior, acaba havendo grande dispersão do sinal como mostrado na figura 2.3, tendo então aplicações apenas para pequenas distâncias, em torno de apenas um 1km.

Figura 2.3 - Representação fibra óptica multimodo com índice degrau.

- Multimodo-Gradual: Possui menores variações nos índices de refração, sendo assim, uma refração gradual, com isto a propagação do sinal sofre menores dispersões, comparadas com multimodo degrau, conseguindo atingir distâncias maiores de até 4km.

Figura 2.4 - Representação fibra óptica multimodo com índice degrau.

Outros tipos:

Plásticas

Alguns tipos de fibras multimodo são feitas com núcleo de plástico polimetil (PMMA), enquanto a casca é feita com polímeros contendo fluoretos, pois apresentam menor índice de refração que o PMMA. Este tipo de fibra por ser de plástico tem baixa resistência a altas temperaturas e pequena distância de transmissão, porém um baixo custo e alta flexibilidade.

As fibras plásticas têm sido bem empregadas na indústria automotiva, por ter uma distância limitada pelo tamanho do automóvel e dimensões pequenas.

2.2. Sensores de deformação e temperatura em fibra óptica

Os sensores de fibra óptica podem ser divididos em duas grandes categorias em duas categorias: Distribuídos e pontuais (semidistribuídos), que serão detalhados a seguir.

2.2.1. Sensores Distribuídos

Os sensores de fibra óptica distribuídos a própria fibra óptica é o elemento sensor. O princípio geral de operação baseia-se na análise da interação do sinal óptico com a própria fibra em função a sua posição. Em função do mecanismo físico é possível o monitoramento de dois pontos remotos podendo estar situados a quilômetros de distância.

Basicamente, estes tipos de sensores usam como princípios de operação espelhamentos não lineares, gerados por laser de alta potência. Os sensores distribuídos são diferenciados basicamente em 3 tipos:

- **DTS (Sensor Distribuído de Temperatura)**
- **DTSS (Sensor Distribuído de Temperatura e Deformação)**
- **DAS (Sensor Distribuído Acústico)**

2.2.2. Sensores de deformação pontuais.

Dentre os sensores de deformação pontuais à fibra óptica os sensores baseados em redes de Bragg são os mais bem estabelecidos em aplicações industriais.

Na próxima seção serão apresentados em mais detalhes os sensores de fibra óptica com redes de Bragg por serem objeto de estudo deste trabalho.

2.2.2.1. Sensores de redes de Bragg

A rede de Bragg consiste em uma modulação periódica do índice de refração. A rede funciona como um filtro reflexivo selecionando um comprimento de onda específico para ser refletido, permitindo a passagem de luz com outros comprimentos de onda. A figura 2.5 demonstra o funcionamento de uma rede de Bragg acoplada em uma fibra óptica.

Figura 2.5 - Representação do funcionamento de uma rede de Bragg inserida em uma fibra óptica.

Este comprimento de onda refletido pela rede se chama: comprimento de onda de Bragg (λ_B), e ele se relaciona com a periodicidade da rede e com o índice de refração, e se dá pela equação 2.3:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.3)$$

Onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo que se propaga no núcleo e Λ é a periodicidade do índice de refração. Como mostrado na figura 2.5, a periodicidade é o que especifica o comprimento de onda a ser refletido. Um feixe incidente na rede de Bragg, terá uma parcela refletida, correspondente a esta periodicidade. O restante do feixe continua viajando pela fibra.

Assim, quando a rede de Bragg estiver sob efeito de esforços mecânicos e/ou variação de temperatura, uma variação na periodicidade será induzida, o que resultará numa variação do comprimento de onda refletido.

A figura 2.5 mostra que parte do espectro do feixe não é refletido pelo sensor de Bragg, continuando a ser transmitido na fibra. Isto permite que novos sensores de Bragg sejam inseridos ao longo da fibra, viabilizando a instalação de diversos sensores de Bragg em uma mesma fibra óptica. Isto é, com uma mesma fibra óptica e com um mesmo instrumental de excitação e captação da resposta é possível monitorar vários pontos de interesse.

Variações na temperatura e carga causam variações na periodicidade na rede, podendo assim se relacionar com o comprimento de onda de Bragg, seguindo as equações 2.4 e 2.5:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = 0,89\varepsilon \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = 9.1 \times 10^{-6} \Delta T \quad (2.5)$$

Sendo ε a deformação em $\mu\varepsilon$ e T a temperatura em $^{\circ}\text{C}$.

3. Metodologia

Neste capítulo serão apresentados todos os procedimentos experimentais, materiais e o planejamento de testes realizados no decorrer deste trabalho de final de curso.

3.1. Materiais

Os materiais utilizados foram basicamente adesivos de alta performance, corpos de prova e sensores de deformação baseados em redes de Bragg. Os itens a seguir trazem informações mais detalhadas sobre eles.

3.1.1. Adesivos Epóxi

Para o projeto foram selecionados dois adesivos epóxi de alto desempenho. Na tabela 3-1 são listados algumas características destes adesivos.

Tabela 3-1-Propriedade dos adesivos selecionados para testes.

Adesivos	1	2
Cura com temperatura	90°C por 1h.	95°C por 1h
Cura sem temperatura	27°C por 8 horas	27°C por 7 dias
Pós cura	-	27°C por 24 horas
Limite de temperatura	-200°C a 200°C.	-55 a 150°C
Módulo de elasticidade	2.8 GPa.	Não informado

3.1.2. Sensores de deformação a fibra óptica baseados em redes de Bragg

Os sensores de fibra óptica utilizados nos testes são fabricados no LSFO. Para fabricação utiliza-se um laser e uma montagem interferométrica na qual, a partir de uma máscara de fase, obtém-se dois

feixes e utilizam-se dois espelhos para ajustar o comprimento de onda de operação da rede de Bragg a ser fabricada. A figura 3.1 mostra um esquema desta montagem. A fonte de luz empregada na observação do processo de fabricação é uma fonte de banda larga centrada em 1550 nm e através de um analisador de espectro óptico é monitorado o perfil do sinal refletido (OSA).

Figura 3.1. Modelo esquemático do sistema interferométrico para fabricação de redes de Bragg.

A figura 3.2 apresenta a curva típica correspondente à reflexão de uma rede Bragg. Neste caso, o pico está centrado em aproximadamente 1520 nm e com uma intensidade de -16 dBm de potência.

Figura 3.2. Espectro de reflexão típico de uma rede de Bragg.

Na tabela 3-2 são listadas as características de potência e comprimento de onda de cada um dos 13 sensores utilizados neste trabalho.

Tabela 3-2-Propriedades dos sensores.

Sensor	Comprimento de onda (nm)	Potência (dBm)
1	1543.6379	-18.9
2	1523.1483	-19.3
3	1527.0660	-18.3
4	1562.1207	-23.1
5	1578.6823	-21.7
6	1561.2910	-20.1
7	1536.5591	-20.1
8	1569.3309	-18.4
9	1516.4329	-17.7
10	1586.6557	-18.3
11	1561.0679	-19.5
12	1581.3290	-19.9
13	1532.4506	-20.6

3.1.3. Corpos de prova

Os corpos de provas foram projetados e confeccionados baseados na norma ASTM E8, especialmente, para este trabalho. Para a confecção foi utilizado o aço 1020, um aço de baixo carbono, com módulo de elasticidade de 200 GPa. A figura 3.3 apresenta as dimensões dos corpos de prova utilizados no trabalho.

Figura 3.3. Dimensões do corpo de prova.

Afim de garantir que os testes a serem realizados durante a caracterização dos adesivos estejam dentro do limite elástico do corpo de prova, foi realizado um teste tração para determinar a tensão de escoamento, resultando num valor de 331 MPa.

Assim, substituindo o valor da tensão de escoamento na equação de Hook e usando o valor de 200 GPa como módulo de elasticidade, constatou-se que para um valor próximo a 1600 $\mu\epsilon$ já seria próximo do ponto de escoamento do material.

$$\sigma = \epsilon \cdot E \rightarrow \epsilon_{ElásticaMáx} = 1655 \mu\epsilon \quad (3.1)$$

Determina-se então, a partir desta deformação, a força máxima que poderá ser aplicada no corpo de prova. A área da seção transversal do corpo de prova, de acordo com as dimensões apresentadas na figura 3.3 é 36 mm².

$$S_y = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

Pela equação 3.2, a força máxima que poderá ser aplicada para não se ter deformação plástica no corpo de prova será de 11.196 kN.

Optou-se por uma carga máxima de teste correspondente a 25% da carga máxima teórica. Impondo assim 1, 2 e 3 kN, a deformação máxima estipulada para estas forças será 416.7 $\mu\epsilon$, definindo assim, um range adequado para os testes.

3.2. Instrumentação dos sensores de deformação

No desenvolvimento deste trabalho são analisados 3 diferentes tipos de instrumentação, um denominado “Livre” (Sem Pressão), outro denominado “Ímã” (Com Pressão) e por último o denominado “Parafuso Micrométrico” (Com Pressão). Visando garantir a máxima transmissão de deformação do corpo de prova para o sensor, durante o processo de colagem foi seguido o seguinte procedimento:

1. **Preparação da superfície:** a superfície do corpo de prova é devidamente lixada e limpa com água, sabonete, acetona e álcool, a fim de retirar impurezas e garantir uma superfície lisa. A figura 3.4 traz a imagem do corpo de prova antes e depois de lixado e limpo.

Figura 3.4. Corpos de prova antes e depois de serem lixados e limpos.

2. **Posicionamento do sensor:** o sensor é posicionado no centro do corpo de prova e fixado com fita adesiva de poliamida, resistente a altas temperaturas, que tem como objetivo de prevenir eventuais desalinhamentos dos sensores durante a instrumentação. A figura 3.5 mostra o sensor fixado no centro do corpo de prova, com fitas de poliamida fixando-o.

Figura 3.5. Corpo de prova com fita de poliamida fixando o sensor para a preparação da colagem.

3. **Preparação do adesivo:** considerando que os adesivos são bi-componentes, é necessário medir os volumes segundo as recomendações dos fabricantes. Uma vez mensuradas as respectivas quantidades, os componentes são misturados até formar uma substância homogênea e aplicada em cima do sensor. A figura 3.6 traz em evidência o adesivo já misturado e pronto, sendo aplicado no corpo de prova com uma haste.

Figura 3.6. Procedimento de aplicação do adesivo.

4. **Aplicação de pressão:** dentro das recomendações do fabricante do adesivo 1, está definido que deve ser aplicada uma pressão de 5 N/cm^2 durante o processo de cura. Duas abordagens foram seguidas: uma utilizando um Ímã permanente e outra através de uma montagem baseada em um parafuso micrométrico, planejado e confeccionado especialmente para este tipo de aplicação. A figura 3.7 ilustra os dois sistemas de aplicação de pressão.

Figura 3.7. Sistema para colocar pressão. (a) Por parafuso micrométrico. (b) Por ímã.

Cabe ressaltar que foram utilizadas uma borracha e uma folha de teflon entre o corpo de prova e o elemento de pressão, a fim de evitar carregamentos não uniformes que pudessem danificar o sensor.

5. **Cura:** os fabricantes de ambos adesivos não estabelecem uma única temperatura de cura. Em ambos os casos é possível realizar a cura a temperatura ambiente ou a temperatura em torno de 90°C. Especificamente para o adesivo 1, foram curados sensores a temperatura ambiente durante 8 horas e a temperatura de 90°C durante uma hora. No caso do adesivo 2, a cura foi por 7 dias a temperatura ambiente e a temperatura de 95°C. Após a cura a 95°C, o sensor instrumentado com o adesivo 2, deve permanecer em descanso por 24 horas a temperatura ambiente.

Após estes procedimentos, está finalizada a instrumentação dos corpos de provas. A figura 3.8 mostra os corpos de provas finalizados para os três diferentes tipos de instrumentação.

Figura 3.8. Corpos de prova finalizados para as 3 instrumentações.

Pode-se reparar, que o corpo de prova instrumentado sem pressão (livre) tem uma camada mais grossa de adesivo, ao contrário dos corpos de prova instrumentados com pressão, pois o sistema de pressão comprime o adesivo espalhando-o.

Repara-se também que a camada de adesivo no corpo de prova instrumentado com o ímã tem uma aparência não tão uniforme. Isso acontece devido à instrumentação referida é menos controlado, devido a forte atração magnética entre o corpo de prova e o ímã.

Na tabela 3-3 são listados os sensores instrumentados nos corpos de prova com as respectivas características de instrumentação.

Tabela 3-3-Propriedades dos CPs.

Adesivo	ID	Tipo de pressão	Cura	Sensor
1	CP10	Livre	90°C por uma hora	1
	CP11	Ímã	90°C por uma hora	2
	CP12	Suporte	90°C por uma hora	3
	CP 01	Ímã	27°C por 8 horas	4
	CP03	Livre	27°C por 8 horas	5
	CP 27	Parafuso Micrométrico	27°C por 8 horas	6
	CP 28	Ímã	27°C por 8 horas	7
2	CP16	Ímã	27°C por 7 dias	8
	CP17	Livre	27°C por 7 dias	9
	CP 26	Parafuso Micrométrico	27°C por 7 dias	10
	CP18	Ímã	95°C por uma hora e 27°C por 24 horas	11
	CP19	Livre	95°C por uma hora e 27°C por 24 horas	12
	CP25	Parafuso Micrométrico	95°C por uma hora e 27°C por 24 horas	13

3.3.Bancada experimental

Esta seção detalha os equipamentos utilizados no projeto, com o intuito de ter melhor conhecimento nas características de cada teste.

- **Interrogador óptico de sensores baseados em redes de Bragg:**

O equipamento utilizado para a interrogação dos sensores de baseado em redes de Bragg foi SM125 fabricado pela Micron Optics, ilustrado na Figura 3.9. Este modelo é um equipamento de 4 canais como uma taxa de aquisição de 1Hz e uma resolução 1 pm.

Figura 3.9. Interrogador óptico Micron Optics 125 sm.

- **Câmara Climática:**

O equipamento utilizado para a cura, a caracterização térmica e de umidade dos sensores foi uma câmara climática, modelo VCL4010 fabricada pelo Vötsch, ilustrada na Figura 3.10. Este modelo permite controlar a temperatura entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, com uma taxa de 3 K/min e uma resolução de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Adicionalmente, ela permite controlar a umidade entre 20% e 95%

Figura 3.10. Câmara de temperatura Vötsch VCL 4010.

- **Máquina de Tração:**

O equipamento utilizado para a caracterização dos sensores em função da carga aplicado foi uma máquina de tração elétrica, modelo Electroplus E10000, fabricada pela Instron. À esta máquina está acoplada uma câmara térmica que permite controlar a temperatura durante os testes de tração. Esta máquina permite fazer testes dinâmicos com uma frequência máxima de 100 Hz e uma carga máxima 10 kN. Já a câmara térmica tem um *range* de operação entre -70 °C e 350 °C e uma estabilidade de 2 °C.

A figura 3.11(a) mostra uma visão geral da montagem experimental, onde é possível visualizar a máquina universal Instron Electroplus E10000, a câmara de temperatura acoplada e o interrogador óptico junto ao computador. Na Figura 3.11(b) mostra o corpo de prova preso às garras.

Figura 3.11. (a) Máquina universal Instron Electroplus E10000 com uma câmara de temperatura acoplada. [1] Máquina de tração; [2] câmara de temperatura controlada; [3] unidade de controle e registro. (b) Visão detalhada dentro da câmara de temperatura. [4] local de inserção do corpo de prova.

3.4. Descrição dos testes de caracterização

A avaliação do desempenho dos sensores baseados em redes de Bragg foram realizados seguindo quatro etapas:

Teste de Temperatura: inicialmente foi realizada uma caracterização de temperatura afim de terminar a sensibilidade e a histereses.

Teste de Carga: em seguida foram realizados testes de tração a fim de determinar a sensibilidade e a histereses.

Teste de umidade: prosseguiu-se com um teste de temperatura idêntico ao primeiro teste com o diferencial que neste caso a umidade foi controlada em 80%.

Teste de Carga: finalmente, foi realizado um outro teste de carga para ver o efeito do teste de umidade.

3.4.1.Planejamento dos testes:

A tabela 4-3 lista os testes realizados para os dois adesivos analisados, denominados adesivos 1 e 2. Na fila são indicados os corpos de prova para o respectivo teste. Para cada teste realizado foram registrados os respectivos parâmetros: temperatura de trabalho, tempo de teste, carga aplicada e umidade.

Tabela 3-4- Testes efetuados

Adesivo	Tipo de teste →	TEMPERATURA	CARGA	UMIDADE
	Aplicado ↓			
1	Temperatura (°C)	30-40-50-60-70	110-150	40-50-60
	Carga (N)	-	0-1000-2000-3000	-
	Corpos de prova	CP 10-CP11-CP12-CP01-CP03-CP27-CP28	CP 10-CP11-CP12-CP03-CP27-CP28	CP 12
	Umidade	-	-	80%
2	Temperatura (°C)	30-40-50-60-70	70 -90	40-50-60
	Carga (N)	-	0-1000-2000-3000	-
	Corpos de prova	CP 16-CP17-CP18-CP19-CP25-CP26	CP 16-CP17-CP18-CP19-CP25-CP26	CP 18
	Umidade	-	-	80%

A seguir uma breve descrição de cada tipo de teste

- **Teste de Temperatura**

Os testes de temperatura na câmara Vötsch 4010 foram efetuados em um ciclo entre as temperaturas de 30 °C a 70 °C com variações de 10 °C, durante duas horas em cada temperatura. A figura 3.12 apresenta a curva típica de resposta do comprimento de onda em função da temperatura ao longo do teste.

Figura 3.12. Curva típica de resposta do ensaio de temperatura.

Cada linha colorida corresponde a um corpo de prova. A linha vermelha corresponde à temperatura da câmara climática.

As áreas horizontais ou patamares representam os momentos nos quais a temperatura estabilizou.

- **Teste de tração**

A fim de analisar o desempenho do sensor a deformação em altas temperaturas os testes de carga foram realizados em duas diferentes temperaturas próximas as temperaturas limite de operação de cada adesivo. Inicialmente, a temperatura da câmara térmica é fixada durante 90 minutos para a estabilização. Após a estabilização, são aplicados 3 ciclos

com as cargas de 1, 2 e 3 kN, durante 2 minutos. Depois a temperatura da câmara térmica é aumentada e o teste de carga é novamente repetido.

No momento do teste de tração, foi utilizado um sensor de rede de Bragg para monitorar a temperatura. Este sensor foi utilizado para fazer a compensação entre a carga e a temperatura.

Como cada adesivo tem a sua característica e o seu limite máximo de temperatura, as temperaturas de estabilização foram diferentes para cada adesivo.

Segundo o fabricante do adesivo 1, a temperatura limite máxima é 200 °C. O teste de carga foi realizado nas temperaturas de estabilização de 110 °C e 150 °C. Já para o adesivo 2, a temperatura limite máxima é de 150 °C. Então as temperaturas de estabilização no teste serão de 70 °C e 90 °C.

A figura 3.13 apresenta a curva típica deste teste de tração.

Figura 3.13. Curva típica de resposta do ensaio de tração.

A figura 3.13 se tem notoriedade em 4 curvas registradas. A azul apresenta a resposta do sensor para a tensão aplicada e com influência da temperatura. Já a curva vermelha escura representa a resposta do sensor de base, utilizado no teste dentro da câmara, porém sem a influência da tensão. Neste caso, apenas registrando a resposta do sensor em função da temperatura.

Na curva vermelha escura, também é possível ver com evidência a temperatura da câmara se estabilizando. A curva preta é o compensado dos dois sensores: o sensor com influência da carga e temperatura (curva azul) e o do sensor de base (curva vermelha escura), tendo assim uma resposta apenas para a carga.

O gráfico vermelho com referência ao eixo y no lado direito da figura 3.12, é a resposta da câmara de temperatura para o teste efetuado, podendo assim saber a exata temperatura aplicada. Também pode-se ver por esta curva que a temperatura aplicada pela máquina também estabiliza.

- **Teste com umidade**

Os testes de temperatura na câmara Vötsch 4010 foram efetuados em três ciclos entre as temperaturas de 40 °C a 60 °C com variações de 10 °C, durante duas horas em cada temperatura, com a umidade controlada em 80%.

Na figura 3.13 apresenta a curva típica do teste de umidade.

Figura 3.14. Curva típica de resposta do teste com umidade.

Para uma análise melhor da influência da umidade na instrumentação, estes corpos de prova, após do teste de umidade, voltaram a ser testados sob influência de carga, agora apenas na temperatura de 110 °C.

4. Análises e Resultados

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e a análise de cada adesivo separadamente.

4.1. Adesivo 1

Nesta seção, serão apresentados as análises e resultados referentes ao adesivo 1.

4.1.1. Teste 1- Avaliação de temperatura.

A figura 4.1 (a) e (b), mostra a variação do comprimento de onda para três corpos de prova instrumentados de forma diferente (livre, ímã e parafuso micrométrico) e curados com e sem temperatura respectivamente em função da temperatura. Estas curvas foram obtidas a partir de uma análise estatística de cada patamar, com auxílio do programa “Origin Pro 8.5” e foram estimados o valor médio e o respectivo desvio padrão.

Figura 4.1. Teste de temperatura. (a) Corpos de prova curados com temperatura. (b) Corpos de prova curados sem temperatura.

A tabela 4.1 mostra as sensibilidades, que corresponde à inclinação da curva, os coeficientes de Pearson e o máximo erro para cada corpo de prova. O erro foi definido como a porcentagem do desvio padrão da inclinação.

Tabela 4-1- Dados da histerese para o teste de temperatura do adesivo 1.

Corpos de prova	Inclinação nm/°C	ρ -Pearson	Erro %	Tipo de Cura
CP 10	0.02433	0.99999	0.14%	Com Temperatura
CP 11	0.02379	0.99982	0.72%	
CP 12	0.02373	0.99998	0.26%	
CP 03	0.02859	0.97055	9.37%	Sem Temperatura
CP 01	0.02096	0.92421	15.60%	
CP 27	0.01037	0.99986	0.64%	
CP 28	0.01353	0.95809	1.13%	

Apesar do fabricante do adesivo 1 afirmar que não existe diferença em curar o adesivo com ou sem temperatura, ao se efetuar o primeiro teste, repara-se em uma variação muito grande na resposta do sensor para os diferentes tipos de cura. Todos os corpos de prova curados com temperatura apresentam uma sensibilidade próxima de 0.024 nm/°C, consequentemente uma alta linearidade, como pode ser analisado através do coeficiente de Pearson 0,999. Por outro lado, os corpos de prova curados sem temperatura apresentam uma dispersão muito grande na sensibilidade. Os CP 27 e 28 tem uma sensibilidade aproximadamente 50% menor que o CP 03.

Pode-se observar também uma histerese muito grande. Em termos quantitativos pode se concluir que, considerando que a sensibilidade é 0,024 nm/°C, a histerese observada no CP 01 de 0.26 nm corresponde a aproximadamente 10 °C. Isso representa que, caso o sensor leia 90 °C, ele poderá estar sob influência de 80 °C ou então 100 °C. Pela mesma analogia, o CP 03 apresentou uma histerese de aproximadamente ± 6.2 °C.

O desvio nas % para os curados com temperatura, apresentam um valor máximo de 0.72% e para os curados sem temperatura até 15.60%.

Pode-se concluir que os corpos de prova curados com temperatura apresentam um melhor desempenho quando comparados com os corpos de prova curados a temperatura ambiente.

Logo após finalizar o teste de temperatura e retirar os corpos de prova da câmara climática, notou-se no CP 03 que a área adjacente ao adesivo apresentava sinais de ferrugem, como mostra a fotografia da figura 4.2(a). Apesar deste dano, o CP 03 aparentemente continuava bem instrumentado, portanto, permanecendo nos testes.

Entretanto ao retirar o corpo de prova CP 01 da câmara de temperatura, reparou-se que o sensor estava descolado, como mostra a figura 4.1(b). O que pode explicar o resultado observado. Por este ocorrido, o CP 01 foi descartado. Para substituí-lo, foi confeccionado um novo corpo de prova CP 27, que também foi instrumentado nas mesmas especificações do CP 01 (curado sem temperatura e por ímã).

(a)

(b)

Figura 4.2. Corpos de prova danificados pós o teste de temperatura. (a) CP 03 com sinais de ferrugem. (b) CP 01 com descolamento de sensor.

Durante a nova instrumentação dos CP 27 e 28 com o adesivo 1, observou-se que a composição do adesivo não estava mais com as características originais. Um dos componentes estava mais viscoso, o que resultou uma homogeneidade menor da mistura. Cabe ressaltar que o adesivo ainda estava na validade.

4.1.2. Teste de tração

Esta subseção está dividida nas temperaturas de realização dos testes de tração.

- **Temperatura de 110°C**

A figura 4.3 (a) e (b) apresenta os gráficos da variação do comprimento de onda de Bragg em função carga aplicada para cada tipo de instrumentação e pelo tipo de cura.

Figura 4.3. Teste de tração a 110 °C. (a) Curados com temperatura. (b) Curado sem temperatura.

Comparando os gráficos na figura 4.3 a e b, percebe-se novamente a variação nas histereses entre os curados com temperatura e os curados sem temperatura. Repara-se também na variação entre os tipos de instrumentação. Pelo gráfico 4.3 (a) nota-se que a histerese é maior na instrumentação livre. Com ímã a histerese ficou em uma faixa intermediária, enquanto a instrumentação com parafuso micrométrico apresentou a menor histerese.

A tabela 4.2 mostra as sensibilidades, que correspondem à inclinação das curvas, os coeficientes de Pearson e o desvio da porcentagem da

inclinação para cada corpo de prova, referentes aos testes de tração à 110 °C.

Tabela 4-2-Dados da histerese para os testes de tração a 110 °C para o adesivo 1.

Corpo de prova	Inclinação nm/kN	ρ -Pearson	Erro %	Tipo de Cura
CP 10	0.1032	0.99455	2.61%	Com Temperatura
CP 11	0.1461	0.99908	1.07%	
CP 12	0.1474	0.99996	0.22%	
CP 03	0.0969	0.98396	4.53%	Sem Temperatura
CP 27	0.0157	0.84998	15.48%	

As inclinações mostram a variação do $\Delta\lambda/N$, ou seja, quanto maior a inclinação maior será a deformação sofrida pelo sensor. As inclinações referentes aos curados sem temperaturas são inferiores se comparadas com as inclinações dos curados com temperatura. Isto representa que os corpos de prova CP 03 e CP 27, sofreram uma deformação menor pela mesma carga aplicada. O que indica que eles não têm uma boa aderência.

Na figura 4.4 é possível observar que para os corpos de prova instrumentados com ímã, pode ocasionar um desalinhamento do sensor, como no caso do CP 11. Apesar disto, este corpo de prova, apresentou desproporções nos resultados de apenas 1% e inclinação coerente com a do corpo de prova CP 12.

Figura 4.4. CP 11, em evidência o sensor 2 instrumentado de forma desalinhada.

O valor da inclinação teórica é 0.216 nm/kN, as inclinações para os corpos de prova CP 11 e CP 12, mostram que estes corpos de prova foram os melhores instrumentados para o adesivo 1. Vale ressaltar que os corpos

de prova CP 11 e CP 12 foram curados com temperatura e instrumentados com aplicação de pressão.

Ao efetuar o teste de carga com o CP 28, este não apresentou deformação influenciada pela carga. O sensor agiu como se tivesse apenas sob influência da temperatura. Ao colocar no microscópio este corpo de prova apresentou bolhas no adesivo instrumentado e que na região em volta do sensor estava completamente descolado. A figura 4.5 traz imagens do microscópio no qual mostra em evidência a volta do sensor descolada e as bolhas que surgiram. Em função desta deformação nula, os dados do CP 28 foram desconsiderados.

A figura 4.3 (b) mostra que o corpo de prova CP 27 apresentou uma inclinação inferior aos demais corpos de prova e pela tabela 4-2 pode-se ver que a inclinação do CP 27 é apenas 10% da inclinação teórica. Isso também é causado por um descolamento do sensor. Os dados do CP 27 foram considerados, pois houve uma resposta mínima do sensor.

Figura 4.5. Fotos do CP 28 pelo microscópio. (a) Em evidência o sensor descolado. (b) Início do sensor e bolhas no instrumentado do adesivo.

A região acinzentada em volta do sensor na figura 4.5, mostra o entorno do sensor colado no corpo de prova CP 28, completamente descolado. A figura 4.5 também mostra as bolhas de ar que surgiram

durante a instrumentação, sinalizando um problema de gasificação que este adesivo pode apresentar.

- **Temperatura de 150 °C**

A figura 4.6 (a) e (b) apresenta o comprimento de onda de Bragg pela carga aplicada no teste de tração para o adesivo 1 a 150 °C.

Figura 4.6. Teste de tração a 150 °C. (a) Curados com temperatura. (b) Curado sem temperatura.

O teste de tração a 150 °C apresentou maiores histereses em relação ao teste de tração à 110 °C, como mostra a figura 4.6 a e b, significando uma interferência na leitura do sensor. Na tabela 4-3, pode-se ver que os valores das inclinações estão inferiores em relação ao teste de 110 °C.

Tabela 4-3-Dados da histerese para o teste de tração a 150°C para o adesivo 1.

Corpo de prova	Inclinação nm/kN	ρ -Pearson	Erro %	Tipo de Cura
CP 10	0.0735	0.9970	2.00%	Com Temperatura
CP 11	0.0996	0.9861	6.02%	
CP 12	0.1037	0.9386	9.16%	
CP 03	0.04116	0.99384	2.79%	Sem Temperatura
CP 27	0.0153	0.9798	5.10%	

Essa diminuição nas inclinações e aumento das histereses mostram que, apesar do fabricante afirmar que o limite de temperatura é 200 °C, ao colocar este adesivo a uma temperatura 50 °C menor (referente a 25% menor) que a máxima, este adesivo não se comporta como o ideal, apresentando erros de leitura.

O corpo de prova CP 12 que apresentou uma boa resposta para o teste de temperatura e para o teste de tração a 110°C com erros inferiores a 1%, passou a apresentar um erro 10% maior.

4.1.3. Teste com umidade

Para o teste de umidade foi escolhido o sensor CP 12, pois este corpo de prova apresentou um bom desenvolvimento no teste de temperatura e no teste de tração à 110 °C. Apesar da variação ao teste de tração à 150 °C, o erro máximo que este apresentou foi de ± 3 °C.

A tabela 4-4 traz os dados para o teste de temperatura, comparando o primeiro sem umidade e o segundo com 80% de umidade. Pode-se ver uma pequena variação na inclinação da histerese após a interferência da umidade. Se a umidade não afetasse a instrumentação, a inclinação que deveria ser semelhante, uma vez que o sensor de rede de Bragg não é alterado pela umidade no ambiente e sim pela temperatura aplicada.

Tabela 4-4- Dados do teste de temperatura com 80% de umidade.

CP 12	Sem umidade	Com umidade
Inclinação nm/kN	0,02373	0,02282
ρ -Pearson	0,99998	0,99975
ERRO %	0.26%	0.68%

Após o teste de temperatura com umidade, o corpo de prova voltou a ser testado por tração. A figura 4.7 traz o gráfico comparando o resultado do teste de tração a 110°C antes da interferência da umidade para o depois.

Figura 4.7.Histerese do teste de tração.

Pela figura 4.7 pode-se reparar no aumento das histereses após o teste de temperatura com umidade. A tabela 4-5 mostra que após a umidade o erro na inclinação aumentou 2%. Podendo ressaltar que a atuação de 26 horas do sensor na umidade elevada já prejudicou a sua instrumentação.

Tabela 4-5- Dados da histerese para o teste de tração a 110 °C para o adesivo 1, antes e depois do teste de umidade.

CP 12	Teste de carga pré-umidade	Teste de carga pós-umidade
Inclinação nm/kN	0.1474	0.1328
ρ -Pearson	0.99996	0.99645
ERRO %	0.22%	2.11%

4.2. Adesivo 2

Nesta seção, serão apresentados as análises e resultados referentes ao adesivo 2.

4.2.1. Teste de temperatura

A figura 4.8 (a) e (b) apresentam os gráficos da temperatura em função do comprimento de onda nos testes de temperatura para o adesivo 2. Nela pode-se reparar um aumento nas histereses em relação ao teste de temperatura para o adesivo 1.

Figura 4.8. Teste de temperatura. (a) Corpos de prova curados com temperatura. (b) Corpos de prova curados sem temperatura.

Pela figura 4.8, repara-se que o adesivo 2 não tem uma diferença significativa nas histereses entre os curados com temperatura para os curados sem temperatura. A tabela 4-6 traz os valores para o teste de temperatura do adesivo 2.

Tabela 4-6- Dados da histerese para o teste de temperatura do adesivo 2.

Corpos de prova	Inclinação nm/kN	ρ -Pearson	Erro %	Tipo de Cura
CP 25	0.01706	0.9473	12.77%	Com Temperatura
CP 19	0.0170	0.9834	6.99%	
CP 18	0.0233	0.9872	6.10%	
CP 17	0.0211	0.9827	7.12%	Sem Temperatura
CP 16	0.0226	0.9590	11.17%	
CP 26	0.0213	0.9904	5.26%	

Com erros superiores pode-se afirmar que o adesivo 2 não apresenta um bom desempenho sob o efeito da temperatura. Encontram-se desproporções nas inclinações de aproximadamente 13%. Com variações nas histereses de até ± 11 °C.

4.2.2. Teste de carga

Esta seção será dividida nas análises dos testes de tração para o adesivo 2 nas temperaturas de 70 °C e 90 °C.

- **Temperatura de 70 °C**

A figura 4.9 apresenta os gráficos separados pelos tipos de cura para a carga aplicada no teste de tração em função do comprimento de onda.

Figura 4.9. Teste de tração a 70 °C. (a) Curados com temperatura. (b) Curado sem temperatura.

O gráfico apresentado na figura 4.9 (a) mostra que o corpo de prova CP 28 apesar de ter histereses, apresenta uma boa inclinação, diferentemente dos corpos de prova CP 25 e CP 19, que foram instrumentados com parafuso micrométrico e livre, respectivamente, que apresentaram grandes variações nas histereses. Porém baixas inclinações.

Já pelo gráfico na figura 4.9 (b) que representa os curados sem temperatura, todos os corpos de prova apresentaram uma inclinação aceitável, porém com grandes histereses.

A tabela 4-7 mostra os valores das inclinações, com os erros do desvio padrão para este teste. Pode-se ver que o corpo de prova CP 19 apresentou uma inclinação baixa de 0.0379 nm.

Tabela 4-7- Dados da histerese para o teste de tração a 70 °C para o adesivo 2.

Corpos de prova	Inclinação nm/°C	ρ -Pearson	Erro %	Tipo de Cura
CP 25	0.0748	0.8920	12.68%	Com Temperatura
CP 19	0.0379	0.9892	3.70%	
CP 18	0.1367	0.9898	3.59%	
CP 17	0.1053	0.9894	3.76%	Sem Temperatura
CP 16	0.1459	0.9923	3.13%	
CP 26	0.0904	0.9545	7.81%	

Ao se estudar o espectro do sensor 12, que está instrumentado no CP 19, repara-se no aparecimento de ruído, após a influência da carga, como detalhado na figura 4.10 (b). Isso aconteceu por um erro na fabricação do sensor.

Figura 4.10. Espectro do corpo de prova CP 19. (a) Antes do teste de carga. (b) Depois do teste de carga.

- **Temperatura de 90°C**

A figura 4.11 apresenta o gráfico do teste de tração à 90°C para o adesivo 2. Onde pode-se ver um aumento nas histereses em relação ao teste de tração à 70°C

Figura 4.11. Teste de tração a 90 °C. (a) Curados com temperatura. (b) Curado sem temperatura.

O limite de temperatura segundo o fabricante do adesivo 2 é 150 °C. Ao efetuar o teste de tração para 90 °C, ou seja, 40% abaixo do limite de temperatura, o desempenho do adesivo não é mais satisfatório. Na tabela 4-8 é possível ver que as inclinações obtidas nestes testes são inferiores que os de tração a 70 °C.

Tabela 4-8-Dados da histerese para o teste de tração a 90 °C para o adesivo 2.

Corpos de prova	Inclinação nm/kN	ρ -Pearson	Erro %	Tipo de cura
CP 25	0.0589	0.8548	15.18%	Com temperatura
CP 19	0.04747	0.9836	4.59%	
CP 18	0.1210	0.9866	4.13%	
CP 17	0.04022	0.9851	4.37%	Sem temperatura
CP 16	0.1429	0.9902	3.52%	
CP 26	0.07570	0.9508	8.15%	

Pelas tabelas 4-7 e 4-8 que os corpos de provas CP 16 E CP 18, foram os que melhor se comportaram, independentemente de serem curados com temperatura ou sem temperatura. Ambos os sensores foram instrumentados com pressão de ímã.

Os corpos de prova CP 25 e CP 26 que foram instrumentados com a pressão de parafuso micrométrico apresentaram os piores desempenhos.

Com as observações apresentadas, é possível concluir que para o adesivo 2 a temperatura de cura não interfere muito no comportamento do sensor, mas sim o tipo de pressão aplicada.

4.2.3. Teste com umidade

Para o teste de umidade do adesivo 2, foi escolhido o sensor CP 18, curado com temperatura e instrumentado com ímã. Este corpo de prova apresentou um bom desenvolvimento no teste de temperatura e nos testes de tração. A tabela 4.9 mostra que para o adesivo 2, o teste de temperatura com umidade não trouxe grandes variações em relação ao teste de temperatura sem umidade.

Tabela 4-9-Dados do teste de temperatura com 80% de umidade.

CP 18	Sem umidade	Com umidade
Inclinação nm/kN	0.02439	0.02281
ρ-Pearson	0.99973	0.99957
ERRO %	0.88%	0.87%

Após o teste de temperatura com influência da umidade, foi realizado um teste de tração. A figura 4.12 apresenta o gráfico comparando o teste de tração à 70 °C.

Figura 4.12. Histerese do teste de tração.

O gráfico representado na figura 4-12 e os valores da tabela 4-10 mostram que para o adesivo 2, a influência da umidade não interferiu significativamente a performance do sensor.

Tabela 4-10-Dados da histerese para o teste de tração a 70 °C para o adesivo 2, antes e depois do teste de umidade.

CP 18	Teste de carga pré-umidade	Teste de carga pós-umidade
Inclinação nm/kN	0.1367	0.1361
ρ-Pearson	0.98977	0.99417
ERRO %	3.59%	2.71%

5. Conclusões

Para o adesivo 1, a cura com temperatura apresentou resultados melhores que os curados sem temperatura. Quanto ao adesivo 2, a cura com ou sem temperatura não interferiu significativamente no desempenho do sensor.

Para o adesivo 1, os curados com parafusos micrométricos apresentaram um resultado melhor quando comparados aos outros meios de aplicação de pressão. Já para o adesivo 2, o parafuso micrométrico apresentou o pior desempenho. Para este adesivo, os corpos de prova instrumentados com ímã apresentaram o melhor desempenho.

Para os testes de umidade, o adesivo 2 apresentou um melhor desempenho em relação ao adesivo 1. Porém vale ressaltar que nos dois adesivos as variações para a umidade foram pequenas.

Com o adesivo 1, foi possível ter um bom comportamento até 150 °C, já que o adesivo 2, com 70 °C, apresentou variações significativas.

Durante os testes, foi notado que o adesivo 1, mesmo estando dentro da validade, apresentou características visualmente alteradas. Ao ser utilizado nessas condições, ocasionou bolhas e uma dificuldade instrumentação. Conclui-se, então, que adesivos apresentem alterações em suas características não sejam utilizados.

6. Referências

- [1] GERE, J., & BARRY, J., G., - “Mecânica dos materiais ”-Tradução da 7ª edição norte Americana.
- [2] “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”- Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/E8.htm>.
- [3] QUINTERO, S., M., M. - “Aplicações de Sensores a Rede de Bragg em Fibras Ópticas na Medição de pH e Deformação de Filmes Finos de Alta Dureza”
- [4] OTHONOS, A., & KALLI, K. - “Fiber Bragg Grating- Fundamentals and applications in Telecommunications and Sensing”.
- [5] LOUZADA, D.,R. - “Detecção e caracterização de danos estruturais através de sensores a rede de Bragg e Redes Neurais Artificiais”.
- [6] MOREIRA,M.,F.- “Desenvolvimento e caracterização de um sistema laser de cristal líquido colesterico acoplado à fibra óptica”
- [7] DataSheet Máquina de tração Instron ElectroPlus E100000.- Disponível em: <http://pdf.directindustry.com/pdf/instron/e10000-all-electric-ynamic-test-instrument/18463-250321.html>
- [8] DataSheet Câmara de temperatura acoplada na máquina de tração. - Disponível em: <http://pdf.directindustry.com/pdf/instron/3119-600-series-environmental-chambers/18463-315825.html>
- [9] DataSheet Câmara de temperatura Vötsch VCL 4010.- Disponível em: http://www.vit.com/sixcms/media.php/2335/VIT_VTL%20VCL%20%28E%29%5B1%5D.pdf