

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Pedro da Silva Quintanilha**

**Extensometria usando sensores a fibra óptica**

***Extensometry using fiber optic sensors***

**Projeto de Graduação**

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

Orientador: Arthur M. B. Braga  
Coorientadora: Paula M. P. Gouvêa

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, por sempre estar comigo em todas as horas, me dar amor, apoio e condições para estudar. Meus pais Carlos e Elizete e meu irmão Lucas, sem eles eu não teria conseguido chegar ao final do curso. Eles representam tudo pra mim e sou eternamente grato por tudo que eles fizeram para mim. Minha família é a minha base pra vida.

Agradeço ao meu orientador Arthur Braga, por ter deixado eu estagiar no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica (LSFO) da PUC-Rio, por ter concedido todo o espaço e por ter me dado a oportunidade de evoluir e aprender neste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço à minha coorientadora Paula Gouvêa, por ter me orientado em todo o processo e por ter me ajudado sempre que possível, com sua experiência em fibras ópticas.

Agradeço à doutora Khrissy Medeiros, pela ajuda, apoio e por ter me incentivado a querer sempre dar o melhor de mim e evoluir, dando sempre conselhos construtivos que me fizeram progredir e amadurecer como pessoa. Ela com toda sua experiência me inspira, e eu sou grato por ela ter me orientado em todas as etapas deste trabalho, dando dicas e conselhos pra eu sempre melhorar e fazer um trabalho cada vez mais qualificado. Sua ajuda e amizade foram fundamentais pra mim neste final de curso.

Agradeço à Laís Gonçalves, uma grande amiga pra vida que se tornou pra mim, ao longo de toda a graduação. Sou muito grato por sempre ter se mostrado disposta a ajudar, em todas as etapas deste trabalho, e por contribuir para deixar o ambiente de trabalho mais leve e menos estressante.

Agradeço à Isabel Camerini, por ter me ajudado com sua experiência em instrumentação de corpos de prova, desde conselhos para a projeção dos mesmos, até a colagem dos sensores, me ensinando a usar programas que eu ainda não tinha conhecimento, fazendo com que eu conseguisse salvar os dados corretamente, obtendo os resultados necessários para este trabalho ser concluído.

Agradeço ao Alexandre Fernandes, por ter usinado o corpo de prova que eu havia projetado para testes.

Agradeço à Roberta Madeira, pela ajuda com sua experiência em extensômetros e ensaios de tração.

Agradeço à toda a equipe do LSFO da PUC-Rio.

## RESUMO

O Sistema de Monitoramento Óptico Direto nos Arames, ou simplesmente MODA, é um sistema que a Petrobras desenvolveu em parceria com o Laboratório de Sensores a Fibra Óptica (LSFO). Este sistema utiliza extensômetros baseados em fibra óptica, extensivamente utilizados nos projetos do Pré-Sal.

Há atualmente a necessidade de desenvolver o sistema para aplicações envolvendo temperaturas superiores as que as atuais, ainda não utilizadas. Para tanto, será necessário testar novos adesivos que sejam especificados para temperaturas mais altas que os adesivos atualmente utilizados. Portanto, o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) proposto consiste na realização de experimentos, tais como testes de tração, e análise de dados dos ensaios, envolvendo novos adesivos para colar a fibra óptica contendo os sensores de deformação baseados em Rede de Bragg.

As minhas atividades serão acompanhar e participar de todas as etapas, como, por exemplo, projetar corpos de provas, participar da colagem dos sensores a fibra óptica nos corpos de provas utilizando os adesivos (instrumentação dos sensores), acompanhar os testes de tração, e analisar e interpretar os resultados dos ensaios. Os ensaios descritos neste trabalho foram realizados a temperatura ambiente por se tratarem de ensaios preliminares para escolher os adesivos a serem testados a temperaturas mais altas. Sendo assim, estes ensaios foram utilizados para identificar os novos adesivos a serem testados sob temperaturas mais altas, e assim verificar se os adesivos servirão para futuras aplicações do sistema MODA ou não.

As análises e todas as conclusões provenientes deste TCC serão feitas utilizando os dados dos ensaios de tração e analisando os espectros de luz detectados pelo sensor Rede Bragg, comparando principalmente os picos dos gráficos envolvendo os comprimentos de onda e potências.

**Palavras chaves:** Fibra óptica, Rede de Bragg, adesivos, sensores, extensômetros, ensaio de tração, espectro de luz, comprimento de onda.

## **ABSTRACT**

The Direct Optical Wire Monitoring System, or simply MODA, is a system that Petrobras developed in partnership with the Fiber Optic Sensors Laboratory (LSFO). This system uses fiber-optic strain gauges widely used in Pre-Salt projects.

There is currently a need to develop the system for applications under temperatures higher than the temperature range for which the system is currently specified. This will require testing new adhesives that are specified at higher temperatures than the adhesives currently used. Therefore, the proposed Course Completion Work (TCC) consists of conducting experiments, such as tensile tests, and analysis of test data, involving new adhesives to bond the optical fiber containing the strain sensors based on Bragg Grid.

My activities will be to follow and participate in all phases, such as designing specimens, participating in the bonding of fiber optic sensors to the specimens using adhesives (sensor instrumentation), monitoring tensile tests, and analyzing and interpreting test results. The tests described in this work were performed at room temperature because they are preliminary tests that have been carried out to choose the adhesives that will be tested at higher temperatures. Therefore, these tests were used to identify the new adhesives to be tested at higher temperatures, and thus to verify if the adhesives will be useful for future applications of the MODA system or not.

The analysis and all conclusions from this TCC will be made using the tensile test data and analyzing the light spectra detected by the Fiber Bragg Grating (FBG) sensor, comparing mainly the peaks of the graphs involving wavelengths and power.

**Keywords:** Fiber optics, Fiber Bragg Grating, adhesives, sensors, strain gauges, tensile test, light spectrum, wavelength.

## Sumário

1. Introdução	11
1.1. Motivação	11
1.2. Objetivo	12
1.3. Organização do trabalho	12
2. Revisão bibliográfica	14
2.1. Fibra Óptica	14
2.1.1. Estrutura	14
2.1.2. Material	15
2.1.3. Propriedades	16
2.1.4. Vantagens	16
2.1.5. Aplicações	18
2.1.6. Fundamentos Básicos	19
2.1.7. Tipos de fibra óptica	22
2.2. Sensor a Rede de Bragg	24
2.2.1. Princípio de funcionamento	24
2.2.2. FBG como sensor de deformação e temperatura	25
2.2.3. Aplicações	26
2.3. Sistema MODA	27
2.3.1. Princípio de Funcionamento	27
2.4. Adesivos	31
2.4.1. Conceito	31
2.4.2. Tipos	31
2.5. Ensaio de Flexão	33
2.5.1. Flexão em quatro apoios	33
2.6. Ensaio de Tração	35
2.6.1. Tensão Normal	36
2.6.2. Gráfico Tensão x Deformação	37
2.7. Extensômetros	38
2.7.1. Clip-On Gage	39
2.7.2. Strain-Gages	40

3. Metodologia	41
3.1. Teste de Flexão	41
3.1.1. Material	41
3.1.2. Corpo de prova	41
3.2. Teste de Tração	49
3.2.1. Material	49
3.2.2. Corpo de prova	49
3.2.3. Instrumentação dos corpos de prova	50
3.2.4. Ensaio de Tração	57
4. Resultados e discussões	60
4.1. Dados da Instron	60
4.1.1. Teste com sensores a Rede de Bragg	60
4.1.2. Teste com sensores Clip-On Gage	63
4.2. Dados do Espectrômetro Óptico (MicronOptics)	65
4.2.1. Análise dos espectros de luz	67
5. Conclusões	72
6. Referências bibliográficas	74

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Estrutura da fibra.....	15
<b>Figura 2.</b> Incidência e refração da luz [adaptado de 3].....	20
<b>Figura 3.</b> Luz sendo propagada na fibra [adaptado de 3]. ....	21
<b>Figura 4.</b> Reflexão total interna [adaptado de 3].....	22
<b>Figura 5.</b> Luz guiada dentro da fibra [adaptado de 3].....	22
<b>Figura 6.</b> Raio se propagando numa fibra monomodo [adaptado de 9].....	23
<b>Figura 7.</b> Representação dos diferentes modos ao longo do núcleo da fibra [10]. ...	24
<b>Figura 8.</b> Funcionamento de um FBG [adaptado de 12].....	25
<b>Figura 9.</b> Conexão entre a fibra óptica e o detector [adaptado de 12].....	25
<b>Figura 10.</b> Plataforma do campo offshore [16].....	28
<b>Figura 11.</b> Detecção da ruptura [16]. ....	28
<b>Figura 12.</b> Riser com rompimento [17].....	29
<b>Figura 13:</b> Transmissão do alerta [16].....	29
<b>Figura 14:</b> Recepção do sinal de alerta [16]. ....	30
<b>Figura 15.</b> Equipe técnica preparada para instalar o sistema MODA [16]. ....	30
<b>Figura 16.</b> Tipos de adesivos [adaptado de 20].....	32
<b>Figura 17.</b> Flexão em quatro apoios [adaptado de 21]. ....	33
<b>Figura 18.</b> Gráfico Momento Fletor [adaptado de 21]. ....	34
<b>Figura 19.</b> Linha neutra e pontos críticos para uma certa seção transversal.....	34
<b>Figura 20.</b> a) máquina de tração e b) corpo de prova antes e depois [adaptado de 22]. ....	36
<b>Figura 21.</b> Gráfico tensão x deformação [adaptado de 22].....	37
<b>Figura 22.</b> a) Esquematização de um Clip-On [24], b) Exemplo real [25]. ....	39
<b>Figura 23.</b> Strain-Gage colado no corpo de prova [24].....	40
<b>Figura 24.</b> Dimensões iniciais do corpo de prova. ....	42
<b>Figura 25.</b> Dimensões iniciais do corpo de prova no SolidWorks. ....	43
<b>Figura 26.</b> Pedaco de madeira utilizado. ....	44
<b>Figura 27.</b> Corpo de prova usinado de madeira. ....	45
<b>Figura 28.</b> Corpo de prova de alumínio. ....	46
<b>Figura 29.</b> Corpo de prova com as medidas para o teste de flexão 4 apoios. ....	47
<b>Figura 30.</b> Dimensões finais do corpo de prova para o teste de flexão 4 apoios.....	48
<b>Figura 31.</b> Dimensões dos corpos de prova usados nos ensaios de tração.....	49

<b>Figura 32.</b> Lixamento e preparo dos corpos de prova. ....	50
<b>Figura 33.</b> Finalização da limpeza dos corpos de provas com acetona.....	51
<b>Figura 34.</b> Corpos de prova devidamente limpos. ....	51
<b>Figura 35.</b> Corpos de provas posicionados. ....	52
<b>Figura 36.</b> Preparação para colocar as fibras com os sensores.....	53
<b>Figura 37.</b> Corpos de prova com as fibras ópticas. ....	53
<b>Figura 38.</b> a) frascos contendo o adesivo, b) e c) adesivo na máquina de vácuo. ...	54
<b>Figura 39.</b> a) teste dos sensores no Micron; b) coleta do adesivo; c) aplicação do adesivo.....	55
<b>Figura 40.</b> Corpos de prova na estufa para o processo de cura do adesivo.....	56
<b>Figura 41.</b> Pós estufa.....	56
<b>Figura 42.</b> Máquina Instron utilizada nos ensaios.....	57
<b>Figura 43.</b> Aparato experimental. ....	58
<b>Figura 44.</b> a) Início do teste, b) estrição prévia à ruptura.....	59
<b>Figura 45.</b> a) Início do teste, b) estrição prévia à ruptura.....	59
<b>Figura 46.</b> Gráficos Tensão x Deformação para os dois CPs instrumentados com Redes de Bragg. ....	61
<b>Figura 47.</b> CP e adesivo intactos após o final do teste.....	62
<b>Figura 48.</b> Adesivo e fibra óptica descolados do CP. ....	63
<b>Figura 49.</b> Gráficos Tensão x Deformação dos CPs instrumentados com o Clip-Gage. ....	63
<b>Figura 50.</b> CP 3 rompido pós-teste.....	64
<b>Figura 51.</b> CP 4 rompido pós-teste.....	65
<b>Figura 52.</b> Leitura dos sensores durante os ensaios dos dois CPs. ....	66
<b>Figura 53.</b> Espectro de luz antes do início do teste. ....	67
<b>Figura 54.</b> Espectros capturados na a) fase elástica b) início do escoamento c) escoamento d) sensor sem medir mais deformação.....	68
<b>Figura 55.</b> Espectro antes do ensaio de tração começar.....	69
<b>Figura 56.</b> Espectros em a) fase elástica b) fase plástica c) fase plástica d) final do teste. ....	70

## **Lista de tabelas**

Tabela 1: Comprimento de onda refletido em cada sensor.....	54
Tabela 2: Identificação dos corpos de prova.....	59

## 1. Introdução

A condução de hidrocarbonetos, por exemplo, para plataformas de petróleo é realizada por meio de linhas de fluxo e *risers* flexíveis. [1] O *riser* constitui a seção dinâmica do conjunto ao ser conectado às linhas de fluxo. Estas, por sua vez, são constantemente influenciadas pelo movimento da corrente marítima.

Os *risers* flexíveis são fundamentais para a extração de petróleo, e são instalados na plataforma verticalmente ou em conformação de catenária, onde eles também podem ser apoiados em flutuadores ou boias. Sua fabricação envolve a combinação de elementos tais como aços, fibras de carbono e camadas de elastômeros, e é necessário assegurar as propriedades e configurações para garantir a integridade do fluido.

Os *risers* flexíveis vêm sendo instalados cada vez mais pela Petrobras, que desempenha um importante papel no aprimoramento dos mesmos, principalmente ao testar seus desempenhos em águas mais profundas e em condições marítimas não antes exploradas, onde tubos flexíveis são altamente utilizados.

### 1.1. Motivação

Para o monitoramento das armaduras de tração de *risers* flexíveis em projetos do Pré-Sal, a Petrobras utiliza um sistema que foi desenvolvido em parceria com o Laboratório de Sensores a Fibra Óptica (LSFO). Este sistema, chamado de Sistema de Monitoramento Óptico Direto nos Arames, ou simplesmente MODA, utiliza-se de extensômetros baseados em fibra óptica.

Atualmente, o MODA já é extensamente utilizado nos campos do Pré-Sal para a faixa de 0°C a 60°C. No entanto, ainda existe a necessidade de desenvolver o sistema para aplicações em ambientes de baixa ou alta temperatura para que possa atender faixas de temperatura no intervalo de -20°C a 90°C. Para isto, será necessário identificar adesivos que tenham ótimo desempenho nesta faixa de temperatura.

## **1.2. Objetivo**

O LSFO da PUC-Rio vem realizando um projeto financiado pela Petrobras que tem como um dos objetivos o desenvolvimento, testes, qualificação e avaliação da confiabilidade de novos adesivos que resistam a uma faixa de temperatura mais ampla do que a do sistema MODA atual, ou seja, de -20 °C a 90°C.

O Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) proposto consiste na identificação de adesivos que possam ser testados na nova faixa de temperatura almejada pelo projeto. Para tanto, o TCC se propôs a testar, sob condições de temperatura ambiente, adesivos especificados para a faixa de temperatura até pelo menos 90°C.

As minhas atividades envolveram o acompanhamento e a participação em todas as etapas, como, por exemplo, projetar corpos de provas, participar da colagem (instrumentação) dos sensores a fibra óptica nos corpos de provas, acompanhar os ensaios de tração, e analisar os resultados dos ensaios.

Os ensaios descritos neste trabalho foram realizados a temperatura ambiente por se tratarem de ensaios preliminares para escolher os adesivos a serem testados a temperaturas mais altas. Sendo assim, estes ensaios foram utilizados para identificar os novos adesivos a serem testados sob temperaturas mais altas, e assim verificar se os adesivos servirão para futuras aplicações do sistema MODA ou não.

## **1.3. Organização do trabalho**

Este trabalho está dividido em 5 capítulos.

O capítulo 1 apresenta a introdução, motivação e objetivo do trabalho.

O capítulo 2 introduz a revisão bibliográfica, referente à fibra óptica, sensores a Rede de Bragg, sistema MODA, adesivos, teste de flexão e tração e, por fim, extensômetros.

O capítulo 3 refere-se à metodologia adotada, mostrando todas as etapas, desde a projeção dos corpos de prova até os ensaios de tração realizados, explicando detalhadamente tudo o que foi feito.

O capítulo 4 apresenta os resultados comentados, obtidos após a análise e interpretação dos dados dos experimentos realizados.

O capítulo 5 mostra o que foi concluído após a realização deste trabalho, e o que pode servir de inspiração e referência para futuros trabalhos.

## **2. Revisão bibliográfica**

### **2.1. Fibra Óptica**

Na década 1920 foi, pela primeira vez, desenvolvida a primeira aplicação formal utilizando uma fibra óptica. Foram utilizadas varetas de vidro [2], posicionadas em um formato circular, e por meio delas foram transportadas imagens.

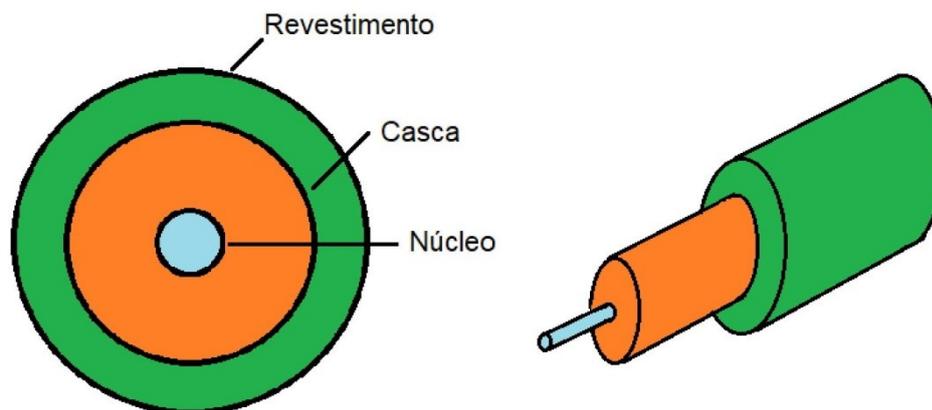
Mais tarde, na década de 1950, foram desenvolvidos importantes métodos e inovações em relação à criação de fibras de vidro, gerando avanços significativos nas indústrias médica e militar.

A partir de 1970, as fibras ópticas entraram para o uso em diversos setores de comunicação, onde até hoje são indispensáveis, devido à importante capacidade de transmissão de sinais, além de não sofrerem interferência de elementos externos.

Com isso, a tecnologia da fibra óptica vem crescendo cada vez mais, e se tornando a cada dia mais essencial para o transporte de dados com alta eficiência e baixo custo.

#### **2.1.1. Estrutura**

As fibras ópticas padrão compartilham a mesma estrutura básica. O centro da fibra é chamado de núcleo [3], e tem índice de refração maior que o da casca que a circunda. Envolvendo a casca, está o revestimento, formado por outro material, como mostrado na Figura 1.



**Figura 1.** Estrutura da fibra.

É a reflexão interna total que guia a luz ao longo do núcleo, e ela ocorre porque o índice de refração do núcleo é mais alto que o da casca. Este fenômeno vai ser abordado detalhadamente mais à frente.

Dependendo do tipo de fibra óptica, a razão entre os diâmetros do núcleo e da casca será diferente. Se o objetivo for transmitir imagens ou luz para iluminação, por exemplo, os núcleos são maiores e as cascas finas. Nas fibras de comunicação, onde se almeja longas distâncias de transmissão, geralmente as cascas são mais espessas que os núcleos.

Às vezes, várias camadas de casca são usadas. Pode-se alterar as propriedades da fibra ajustando todas essas estruturas.

O diâmetro padrão das fibras de telecomunicação, por exemplo, é de 125 micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), ou 0,005 pol. Um revestimento de outro material, geralmente de acrilato, aumenta o diâmetro para cerca de 250  $\mu\text{m}$ , facilitando o manuseio e protegendo as superfícies das fibras contra arranhões, impactos e outros danos mecânicos futuros, inclusive evitando que a fibra óptica seja quebradiça e permitindo seu fácil manuseio.

### **2.1.2. Material**

A grande maioria das fibras ópticas é feita de sílica (vidro) dopada com pequenos níveis de impureza com o objetivo de ajustar o índice de refração.

As fibras mais utilizadas nas telecomunicações são geralmente feitas de dióxido de silício puro, conhecido como *sílica* ( $SiO_2$ ).

Por outro lado, as fibras utilizadas em imagens médicas geralmente são de vidro menos puro ou até de plástico. Alguns tipos de fibra óptica de vidro utilizadas em cirurgias, conhecidas como *fibras ópticas cirúrgicas*, possuem um revestimento de silicone, garantindo segurança e durabilidade.

As fibras ópticas feitas de plástico fornecem flexibilidade e um bom manuseio, além de funcionarem como uma camada externa para possíveis choques mecânicos.

### **2.1.3. Propriedades**

As propriedades da fibra óptica dependem de sua composição e estrutura.

Mecanicamente, são geralmente bastante fortes, rígidas e possuem uma flexibilidade que depende de seu diâmetro.

Diferente dos fios de metal, as fibras ópticas, após serem dobradas, voltam à sua forma original, desde que não seja ultrapassado um certo limite, a partir do qual se quebram.

As fibras ópticas de vidro são consideravelmente fortes, mas em contrapartida estas podem falhar, caso possíveis rachaduras na superfície se propagem através delas, podendo posteriormente se tornar inviáveis para uso.

### **2.1.4. Vantagens**

São várias as vantagens da fibra óptica, se comparada com outros cabos de transmissão de dados. Abaixo seguem algumas das principais [4].

#### **2.1.4.1. Melhor capacidade de informação**

Se comparadas com os fios de cobre, por exemplo, as fibras ópticas possuem uma maior largura de banda, ou seja, mais informação pode ser transmitida, utilizando apenas uma linha de transmissão, diminuindo assim o número de linhas físicas necessárias para o envio de uma certa quantidade de dados.

#### **2.1.4.2. Imunidade à interferência elétrica**

As fibras ópticas transmitem luz, e não eletricidade, e são um material dielétrico. Isto fornece às fibras ópticas uma importante vantagem: imunidade aos efeitos das interferências eletromagnéticas (em inglês *electromagnetic interference, EMI*), fato que não é presente em fios de cobre, por exemplo.

#### **2.1.4.3. Longa distância de transmissão**

Diferente dos fios de cobre, as fibras ópticas possuem a capacidade de transmitir dados a longas distâncias, pois sua atenuação é mais baixa. Com isso, há uma redução quanto aos equipamentos e componentes necessários para o reforço e restauração (regeneração) dos sinais ao longo de todo o caminho pelo qual os dados vão percorrer. Esta é mais uma vantagem dos sistemas a fibra óptica, isto é, reduzir os custos e simplificar o sistema.

#### **2.1.4.4. Tamanho e peso**

As fibras são leves e pequenas, sendo muito boas para sistemas em que uma grande quantidade de cabos deve ser instalada e enrolada, ou então em instalações dentro dos satélites, por exemplo, onde deseja-se que o material a ser instalado seja o mais leve possível.

### 2.1.5. Aplicações

Abaixo encontram-se outras aplicações para fibras ópticas. [3]

- Conexões com provedores de serviços de Internet.
- Cabos para equipamentos remotos de notícias.
- Ligações entre a rede telefônica e as antenas para serviço telefônico móvel.
- Transmissão de sinais dentro de navios, aeronaves e automóveis.
- Ligações entre computadores e terminais de vídeo de alta resolução utilizados para fins de design assistido por computador.
- Transmissão de dados em ambientes difíceis, principalmente onde há grave interferência eletromagnética.
- Sistemas de telecomunicações de longa distância em terra e no mar para transportar muitos sinais digitalizados simultaneamente em longas distâncias, incluindo cabos submarinos que atravessam o oceano e redes nacionais de *backbone* para transmissão de telefone e Internet.

Atualmente, a tecnologia da fibra óptica se expande cada vez mais em várias áreas além da comunicação, como, por exemplo:

- Feixes de fibra óptica para imagem e iluminação
- Endoscópios úteis para a visualização do interior do corpo humano, sendo até possível tratamentos revolucionários de doenças com luz, ao invés de cirurgia.
- Sensores ópticos para medições de pressão, campos magnéticos e outras diversas quantidades.

## 2.1.6. Fundamentos Básicos

A interação da luz com a matéria e os princípios básicos da óptica explicam o funcionamento das fibras ópticas.

Para entender como as fibras ópticas funcionam, é fundamental compreender o conceito físico de *reflexão interna total* e tudo o que ele envolve.

### 2.1.6.1. Índice de refração

Considerando  $v$  a velocidade da luz no meio presente, o *índice de refração* é dado pela seguinte fórmula [5]:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Onde  $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ , valor da velocidade da luz no vácuo.

Quando um dos meios é o vácuo, chamamos então de *índice de refração absoluta*. O índice de refração do ar na temperatura ambiente e pressão atmosférica é tomado como sendo aproximadamente  $n_{ar} = 1$ .

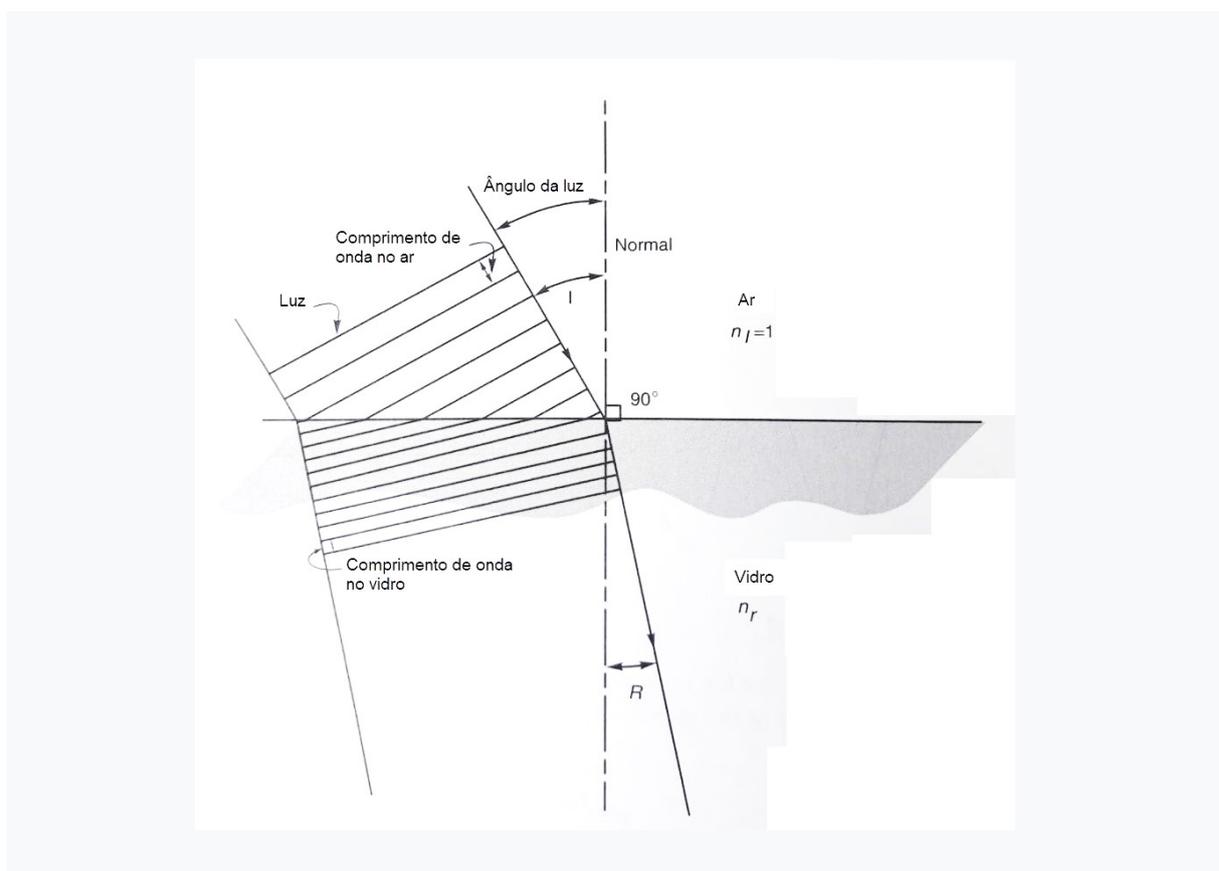
### 2.1.6.2. Lei de Snell

Ao passar por uma superfície onde o índice de refração muda, a luz sofre uma mudança de direção. Esta mudança vai depender dos índices de refração dos dois meios envolvidos, além do ângulo em que a luz atinge a superfície que divide os dois meios.

Tanto o ângulo de incidência quanto o de refração são medidos a partir de uma linha normal (perpendicular) à superfície, onde a relação entre os dois é conhecida como *Lei de Snell*, descrita a seguir (adaptado de [6]).

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r \quad (2)$$

Onde  $n_i$  e  $n_r$  são, respectivamente, os índices de refração do meio no qual a luz se propaga inicialmente (meio da luz incidente) e do meio em que a luz sofre refração, e  $\theta_i$  e  $\theta_r$  são, respectivamente, os ângulos de incidência e refração. Observe que na Figura 2 os ângulos  $\theta_i$  e  $\theta_r$  são mostrados como I e R. A Figura 2 mostra um exemplo onde a luz vai do ar para o vidro.

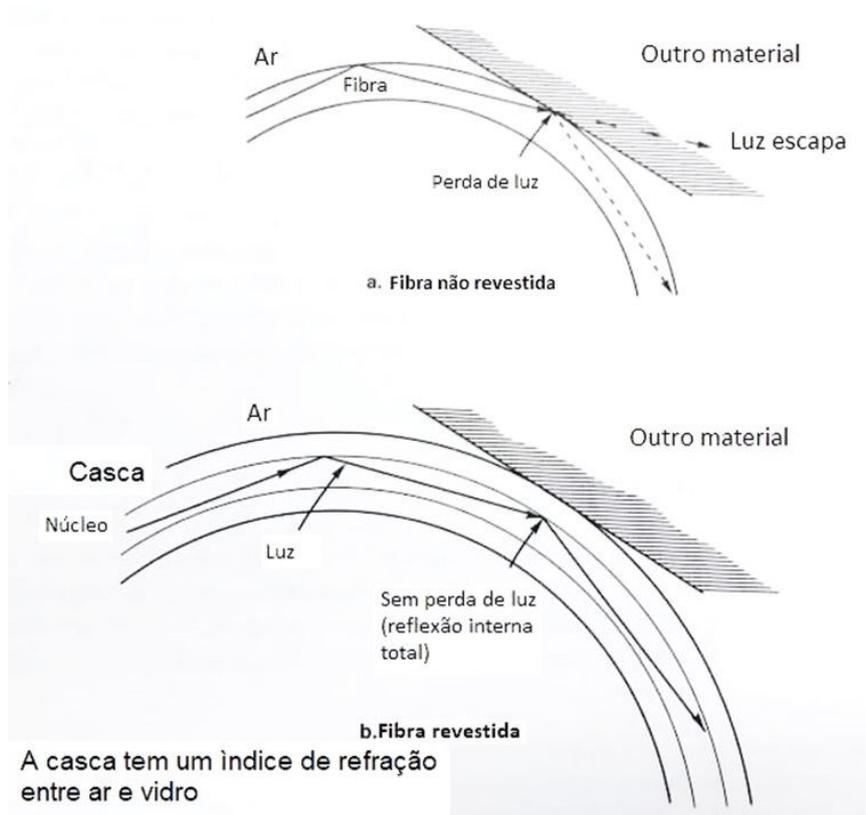


**Figura 2.** Incidência e refração da luz [adaptado de 3].

Nota-se que, embora a frequência da onda não mude, o comprimento de onda fica mais curto, pois a luz diminui sua velocidade ao passar pelo vidro, de forma tal que há uma mudança de direção da mesma, diferenciando o ângulo de incidência do ângulo de refração, seja a superfície curva ou plana.

### 2.1.6.3. Ângulo crítico e reflexão interna total

O que mantém a luz dentro da fibra óptica (Figura 3) é a chamada *reflexão interna total*, que ocorre enquanto o ângulo de incidência for maior que o chamado *ângulo crítico* ( $\theta_c$ ), onde a luz vai ser totalmente refletida, permanecendo no meio mais denso e sendo transportada neste meio, onde o índice de refração é maior do que o índice do meio que o circunda [7].

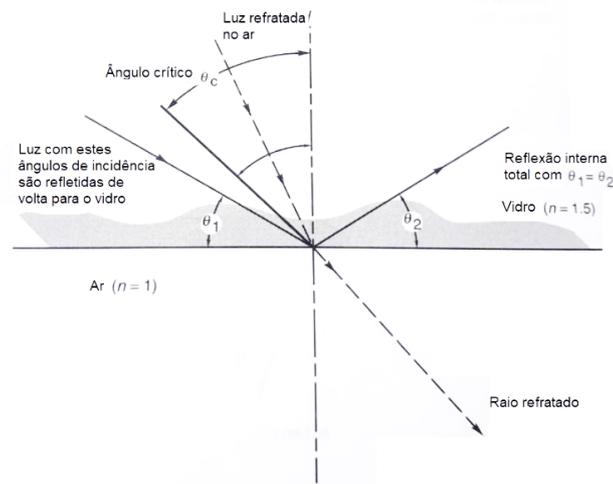


**Figura 3.** Luz sendo propagada na fibra [adaptado de 3].

A partir da Equação 3, encontra-se a fórmula para ângulo crítico abaixo [3].

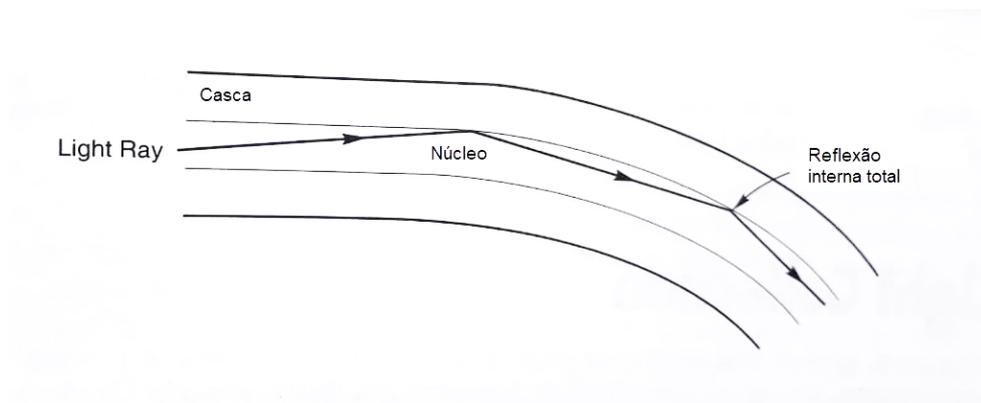
$$\theta_c = \sin^{-1}(n_r/n_i) \quad (3)$$

A Figura 4 apresenta o fenômeno de reflexão interna total.



**Figura 4.** Reflexão total interna [adaptado de 3].

A Figura 5 é uma representação em 2D da luz sendo guiada dentro da fibra óptica, através de tal fenômeno.



**Figura 5.** Luz guiada dentro da fibra [adaptado de 3].

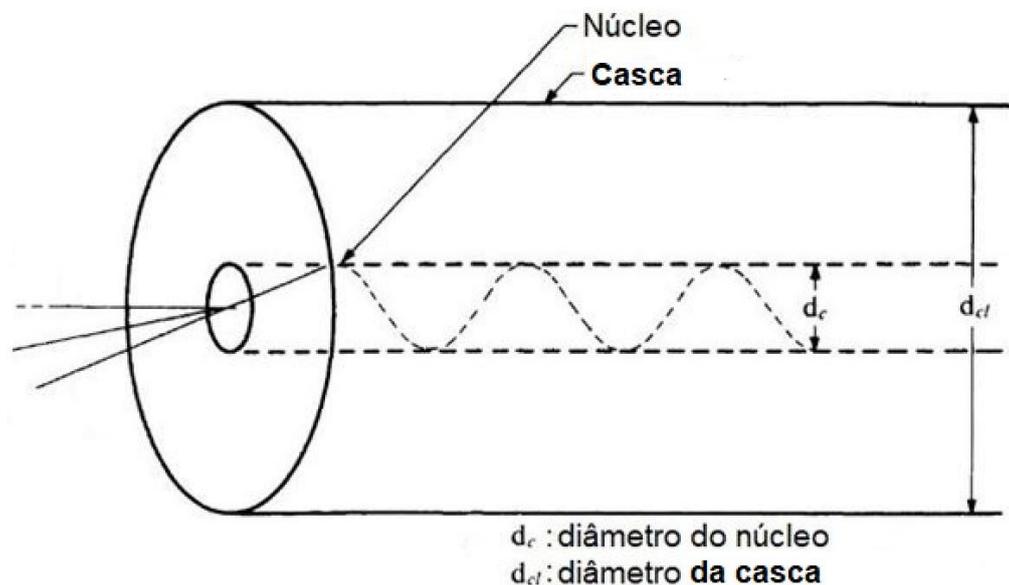
### 2.1.7. Tipos de fibra óptica

A quantidade de modos propagados dentro do núcleo da fibra e as diferenças nos diâmetros da estrutura diferem os diferentes tipos.

### 2.1.7.1. Monomodo

Nas fibras monomodo, apenas um modo é propagado em seu interior. Este tipo de fibra é mais difícil de ser manuseado [8] e juntado a outros equipamentos, já que o diâmetro máximo do núcleo é de apenas  $9\ \mu\text{m}$ . Por outro lado, são as melhores fibras ópticas para serem usadas para a propagação de longas distâncias, ou seja, mais de algumas dezenas de metros. Além disso, são fibras extremamente úteis para comunicações de alta velocidade.

A **Figura 6** mostra uma representação de uma fibra óptica monomodo.

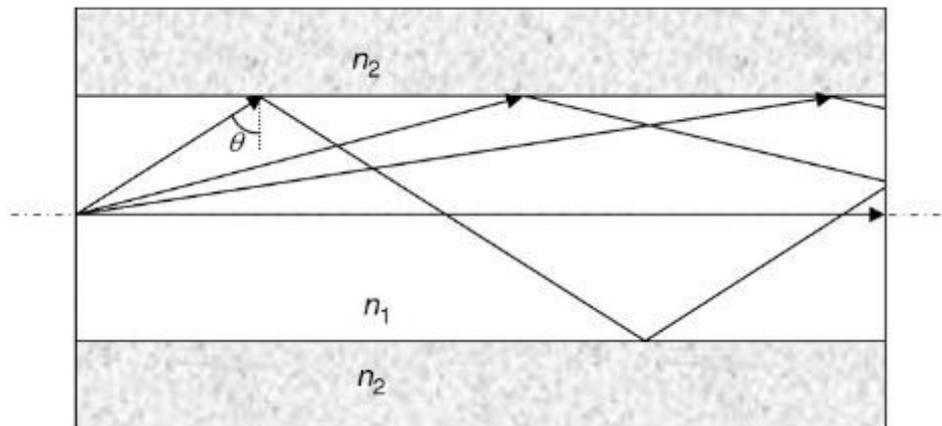


**Figura 6.** Raio se propagando numa fibra monomodo [adaptado de 9].

### 2.1.7.2. Multimodo

Nas fibras ópticas multimodo, há a propagação de mais de um modo ao longo do núcleo da fibra, onde cada um incide a parede do núcleo com um ângulo diferente, diferente velocidade e em diferentes instantes de tempo [10]. A Figura 7 mostra um esquema para melhor visualização.

As fibras ópticas multimodo padrão têm núcleo de diâmetro igual a  $50\ \mu\text{m}$  ou  $62,5\ \mu\text{m}$  [8]. O diâmetro da fibra com a casca também é igual a  $125\ \mu\text{m}$ .



**Figura 7.** Representação dos diferentes modos ao longo do núcleo da fibra [10].

## 2.2. Sensor a Rede de Bragg

### 2.2.1. Princípio de funcionamento

Sensores a redes de Bragg (do inglês *Fiber Bragg Grating*, *FBG*), [11] normalmente se apresentam na forma de variação espacial periódica do índice de refração, posicionados no núcleo da fibra óptica. Frequentemente esta variação periódica tem uma distribuição senoidal ao longo da fibra.

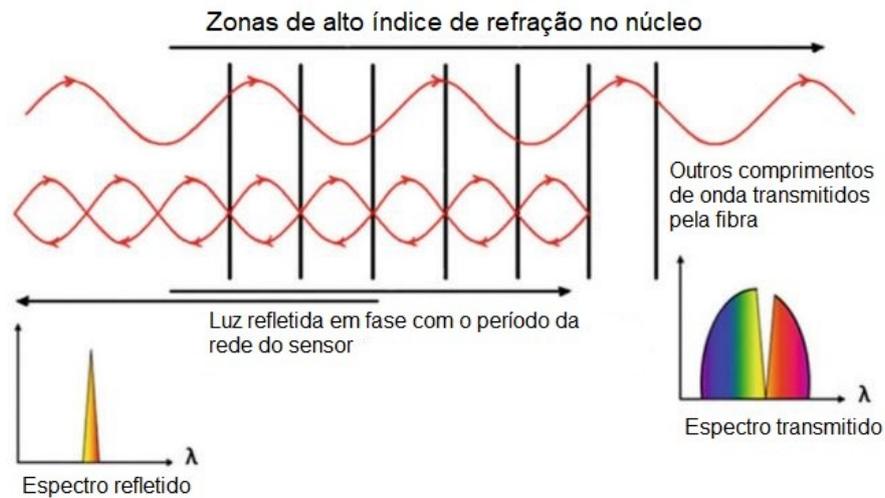
A perturbação periódica provoca, então, reflexão da luz com um determinado comprimento de onda [12], que por sua vez é chamado de *comprimento de onda de Bragg* ( $\lambda_B$ ), cuja fórmula se encontra abaixo [13].

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (4)$$

onde  $n_{eff}$  é o índice de refração do núcleo, e  $\Lambda$  é a periodicidade da rede.

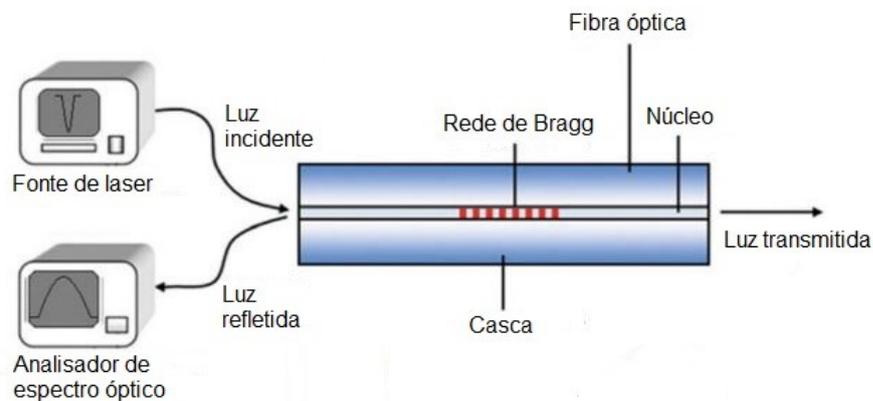
A modulação de um sensor FBG padrão é uniforme [12], ou seja, a região onde o índice de refração é maior quando comparado ao do núcleo da fibra é uniformemente distribuída ao longo da fibra. Sempre que a luz incide em tal região, ocorrerá a reflexão somente da luz cujo comprimento de onda for igual a  $\lambda_B$ . O resto da luz passa através do sensor e continua percorrendo o restante do núcleo da fibra.

A Figura 8 representa o princípio de funcionamento de um sensor FBG.



**Figura 8.** Funcionamento de um FBG [adaptado de 12].

Na Figura 9 encontra-se um sensor FBG gravado em uma fibra óptica. A fibra óptica está conectada à fonte de luz e ao detector para uma melhor visualização de como e onde seria feita sua introdução na mesma para, então, utilizá-lo.



**Figura 9.** Conexão entre a fibra óptica e o detector [adaptado de 12].

### 2.2.2. FBG como sensor de deformação e temperatura

Qualquer deformação ( $\epsilon$ ) ou mudança de temperatura ( $T$ ) gera uma mudança no comprimento da fibra óptica, que gera uma mudança do comprimento de onda de

Bragg  $\lambda_B$  (Equação 5), ocasionando um deslocamento do mesmo, cuja fórmula encontra-se abaixo [13].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\varepsilon\varepsilon + K_T T \quad (5)$$

O primeiro termo da equação representa os efeitos da deformação e o segundo, os efeitos da temperatura.

Os coeficientes  $K_\varepsilon$  e  $K_T$ , coeficiente de deformação e de temperatura, respectivamente, são ambos afetados pelas propriedades mecânicas estruturais, pelas propriedades do material que reveste a fibra e pelo material usado para unir a fibra à estrutura, os chamados adesivos, que serão abordados mais a fundo posteriormente.

Antes de qualquer tipo de ensaio ser realizado, é importante colar um comprimento de fibra óptica suficiente no corpo de prova que garanta uma eficaz transferência de deformação entre o mesmo e a fibra, e o sensor FBG ser utilizado com sucesso [14].

### 2.2.3. Aplicações

Algumas aplicações do sensor FBG e sua tecnologia encontram-se abaixo [15].

- Aplicações onde é necessário um dispositivo totalmente passivo: o fato dos sensores FBG não precisarem de uma fonte elétrica para funcionar, faz com que não seja necessária a presença de equipamentos próximo ao seu local de medição. Este fato, além de facilitar a instalação do sensor em aplicações envolvendo ambientes agressivos, também protege o sensor de interferências eletromagnéticas.
- Aplicações envolvendo multiplexação por tempo e por comprimento de onda (TDM WDM): algumas aplicações mostram a necessidade de ter mais de um local monitorado. Quando se trata de sensores FBG, é possível fazer TDM e/ou WDM porque

não é necessário que toda a fibra óptica seja usada para o sensoriamento de tensão ou temperatura, mas sim somente a parte na qual o sensor está inserido, que é a que fica sensível à deformações e alterações na temperatura. Isso dá ao sensor FBG uma capacidade de multiplexação, já que vários sensores FBG podem ser usados ao longo da mesma fibra, possibilitando o sensoriamento em vários pontos distintos, sem uma instalação complicada para isto.

- Os sensores FBG possuem a chamada Redundância, o que é muito útil para um trabalho seguro e confiável. O fato do interrogador conseguir trabalhar com vários sensores FBG ao mesmo tempo, junto com o princípio de funcionamento de um sensor FBG já citado acima, faz com que tal redundância seja implementada sem elevados custos.

## **2.3. Sistema MODA**

O sistema MODA, sigla para *Monitoramento Óptico Direto no Arame*, é fornecido para indústrias offshore de óleo e gás pela empresa Ouro Negro, entre outras. [16] Os principais objetivos deste sistema estão na minimização de custos de manutenção e a não interrupção da operação em unidades offshore.

### **2.3.1. Princípio de Funcionamento**

A base do sistema MODA são sensores a fibra óptica, que são seguros, e têm alta exatidão e confiabilidade.

No intuito de prevenir acidentes que geram impacto tanto no meio ambiente, quanto na própria operação, os sensores vão ser responsáveis pela emissão de alertas instantâneos, caso haja algum rompimento de arames da armadura de tração (problema mais recorrente) dos chamados *risers* flexíveis.

Este rompimento, por sua vez, pode se dar por níveis elevados de tensão, desgaste em excesso ou até mesmo por corrosão. Sendo assim, eles ocorrem de forma progressiva.

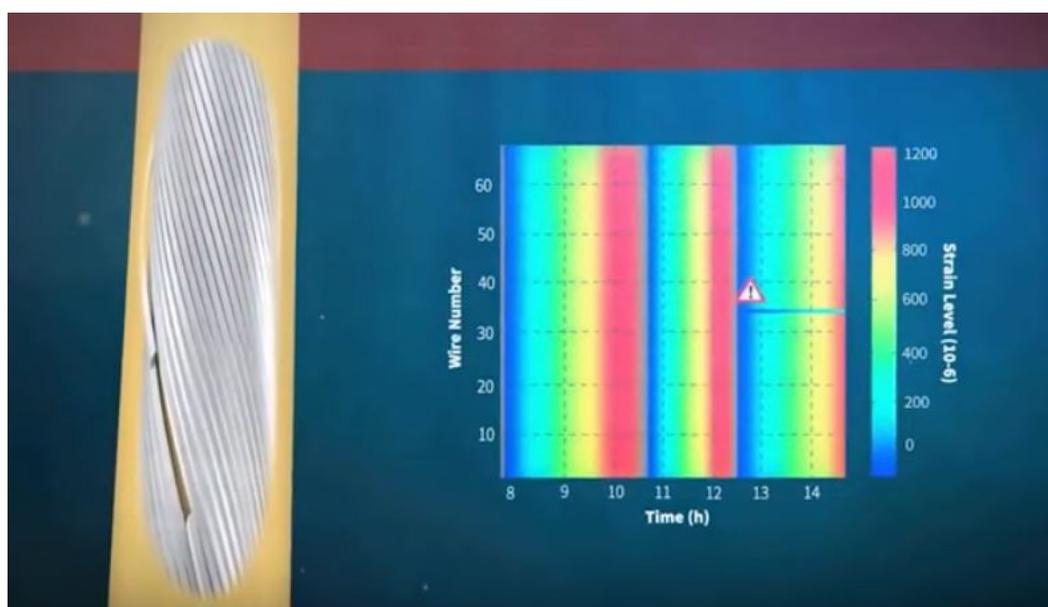
Além da emissão dos alertas, o sistema MODA também atua processando tal informação e gerando um diagnóstico em tempo real para o duto flexível, para, assim, minimizar perdas de tempo e os custos de conserto dos *risers*.

A Figura 10 mostra uma plataforma do campo offshore, no qual o MODA é implementado.



**Figura 10.** Plataforma do campo offshore [16].

Na Figura 11 encontra-se uma representação de uma ruptura localizada no *riser*, junto com o alerta de detecção da mesma.



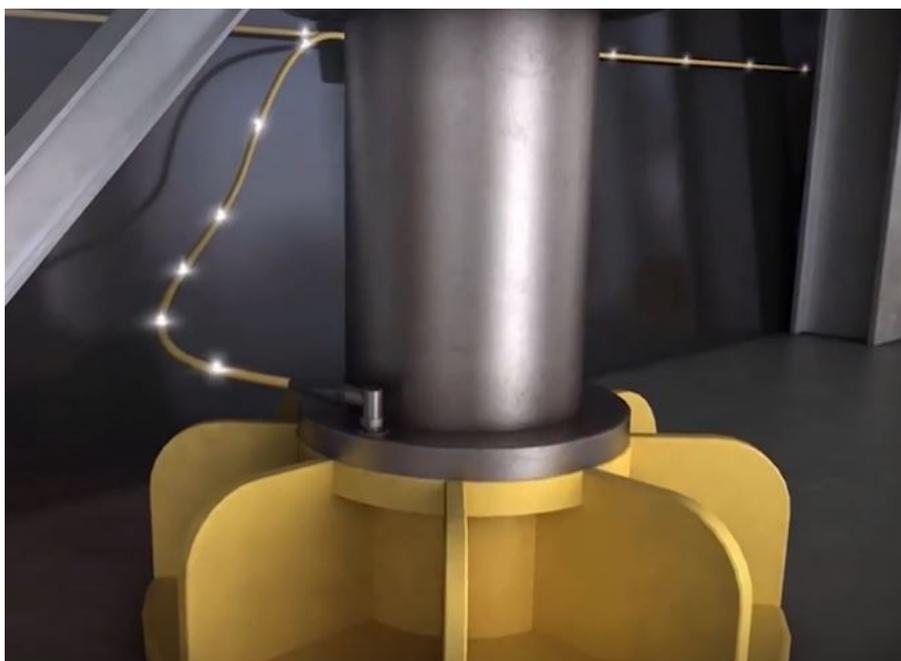
**Figura 11.** Detecção da ruptura [16].

Na Figura 12 pode-se observar um exemplo concreto de um riser com rupturas.



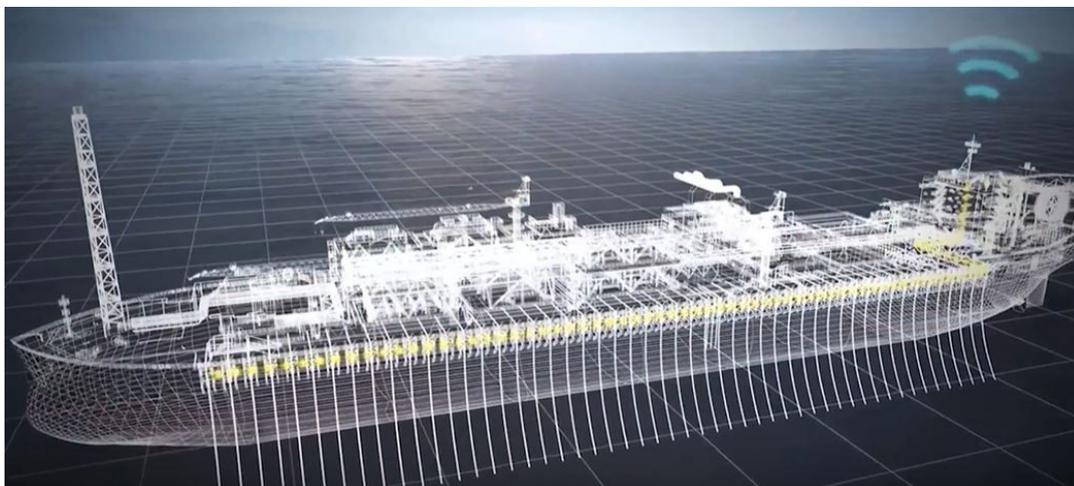
**Figura 12.** Riser com rompimento [17].

A Figura 13 mostra uma representação da transmissão do sinal de alerta pelo fio, em tempo real ao momento do rompimento do *riser*.



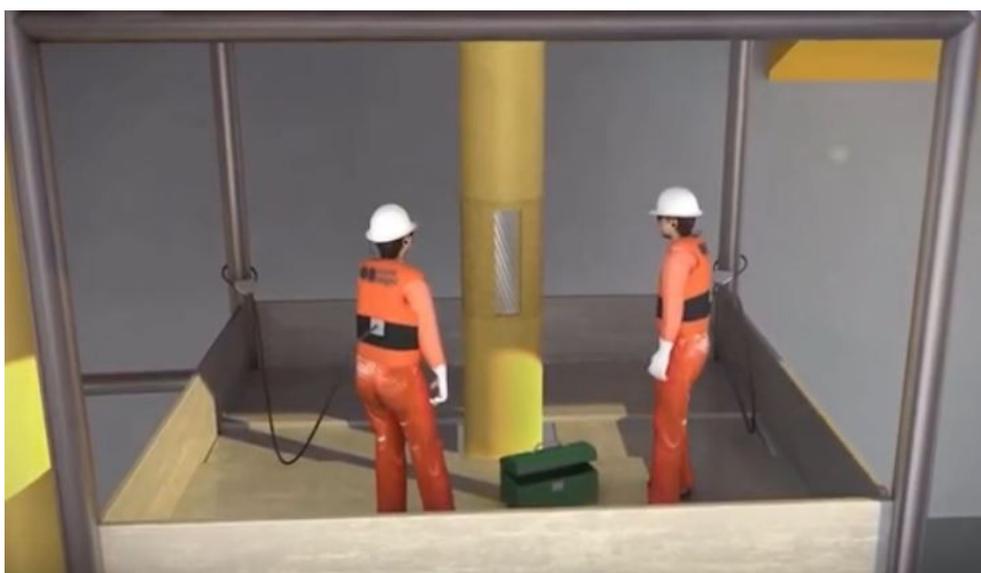
**Figura 13:** Transmissão do alerta [16].

Quando o sinal é recebido, ações são rapidamente tomadas para auxiliar o operador no reparo e manutenções necessárias, no menor intervalo de tempo possível.



**Figura 14:** Recepção do sinal de alerta [16].

É importante ressaltar que o sistema MODA pode ser implementado em *risers* que já vinham atuando sem o mesmo. Para isso, uma equipe especializada e capacitada é acionada sempre que se deseja instalá-lo, como pode ser visto na Figura 15.



**Figura 15.** Equipe técnica preparada para instalar o sistema MODA [16].

## **2.4. Adesivos**

A adesão é um processo que vem se desenvolvendo muito em várias indústrias tecnológicas e científicas. [18] A forma mais moderna de adesão hoje em dia é por meio de adesivos, substituindo técnicas de fixação mecânica mais clássicas como, por exemplo, a rebiteagem.

O uso de adesivos está presente em diversas áreas, principalmente nas que envolvem domínios técnicos mais avançados, como a indústria espacial, aeronáutica, eletrônica e automobilística. São muito importantes também para a medicina, principalmente em cirurgias.

### **2.4.1. Conceito**

A função dos adesivos [19] é fazer a conexão entre dois ou mais componentes, onde, diferente das conexões mecânicas, as juntas adesivas (produto que se obtém após fazer a conexão por meio de adesivos) possibilitam a distribuição da carga em uma maior área, reduzindo tensões localizadas.

Num projeto de engenharia, por exemplo, a escolha do melhor adesivo para a conexão desejada depende de uma série de fatores, incluindo o tipo de adesivo com o qual se pretende trabalhar.

### **2.4.2. Tipos**

São vários os tipos de adesivos que se encontram no mercado, todos com suas diferentes características, desde o processo de cura - que compreende o momento em que o adesivo é implementado até o momento em que ele está pronto para o uso - até o tipo de material, preço e composição. A Figura 16 mostra isto resumidamente.

Modo de cura	Tipos de adesivos	Exemplo	Características
<ul style="list-style-type: none"> <li>sem cura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>sensíveis à pressão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>resinas acrílicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>não prejudica o meio ambiente</li> <li>rápido processamento</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>cura física</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>adesivo de contato</li> <li> fusão a quente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>borracha de neoprene</li> <li> poliamida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>fácil processamento</li> <li> barato</li> <li> isento de solventes</li> <li> muito rápido</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>reação química após a mistura de diferentes componentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> fusão a quente com pós-cura</li> <li> adesivo em duas partes e multi-partes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> PUR</li> <li> resina epóxi</li> <li> PU (UP)</li> <li> resina epóxi</li> <li> borracha de poliuretano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>fácil processamento</li> <li> isento de solventes</li> <li> caro procedimento</li> <li> material de fonte reativa</li> <li> aplicação de calor não necessária para a cura</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>aplicação de calor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> adesivos reativos de uma parte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> resina epóxi</li> <li> resina fenólica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> caro</li> <li> aguentam as condições mais extremas</li> <li> menos substâncias reativas que os de uma parte</li> </ul>

**Figura 16.** Tipos de adesivos [adaptado de 20].

## 2.5. Ensaaios de Flexão

Quando se trata de flexão em vigas, há a chamada *flexão pura*, *flexão não uniforme*, e a combinação das duas. [21] A primeira se dá quando há a presença de um momento fletor constante, já a segunda, quando há forças cortantes, ou seja, ao longo da viga/corpo de prova o momento fletor não permanece constante.

Para este trabalho vale citar apenas o caso em que o momento fletor não é constante ao longo da viga, num ensaio de flexão de quatro apoios.

### 2.5.1. Flexão em quatro apoios

Através da Figura 17 pode-se visualizar como que os apoios e as forças estarão posicionados, para, então, ser possível a obtenção do gráfico de momento fletor ao longo da viga.

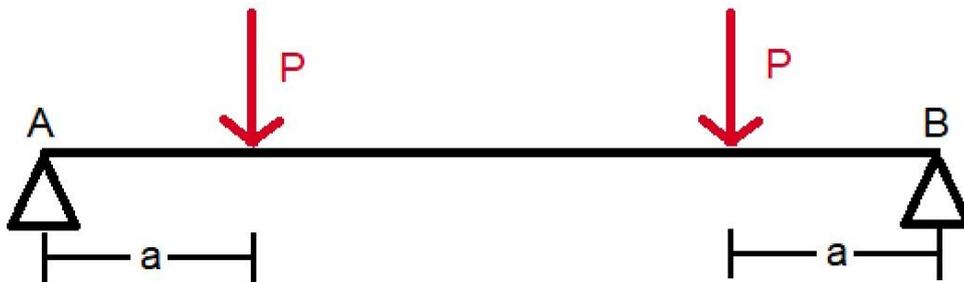


Figura 17. Flexão em quatro apoios [adaptado de 21].

Para este tipo de configuração, a carga máxima atuando é igual ao dobro da força  $P$ , e o momento máximo na viga é igual a  $M_{m\acute{a}x} = Pa$ , o que pode ser visualizado na Figura 18.

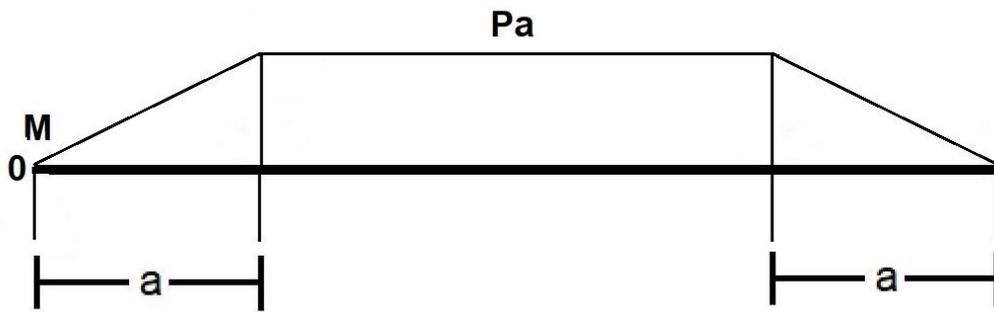


Figura 18. Gráfico Momento Fletor [adaptado de 21].

### 2.5.1.1. Tensão normal máxima

Nos pontos mais afastados da linha neutra, presentes na Figura 19, em qualquer seção transversal da viga são onde estão as máximas tensões fletoras de compressão e tração.

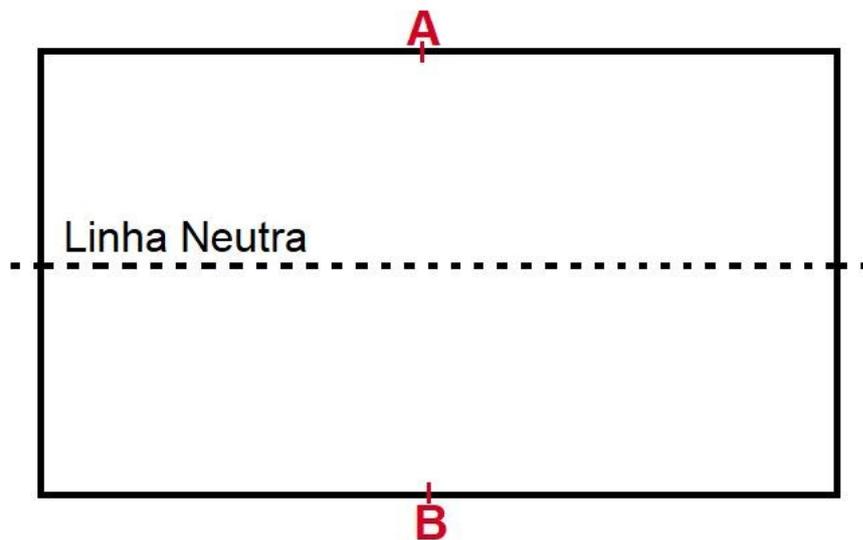


Figura 19. Linha neutra e pontos críticos para uma certa seção transversal.

A fórmula para a tensão normal máxima é de extrema importância para quando se quer, por exemplo, projetar um corpo de prova para um determinado teste de flexão.

Variando a geometria da seção transversal da amostra, varia-se a fórmula referente à tensão normal máxima, o que pode ser visto a seguir.

#### 2.5.1.1.1. Seção transversal retangular

Considerando uma viga com seção transversal retangular,  $M_{m\acute{a}x} = Pa$ , altura  $h$  e largura  $b$ :

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6M_{m\acute{a}x}}{b.h^2} \quad (6)$$

#### 2.5.1.1.2. Seção transversal circular

Considerando uma viga com seção transversal circular,  $M_{m\acute{a}x}$  e diâmetro  $d$ :

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{32M_{m\acute{a}x}}{\pi d^3} \quad (7)$$

### 2.6. Ensaio de Tração

O ensaio de tração é muito útil quando se quer obter o gráfico *tensão x deformação* de um determinado material, utilizando para isto um chamado *corpo de prova*.

### 2.6.1. Tensão Normal

Considerando uma determinada carga  $P$  que será utilizada na máquina, o corpo de prova vai sofrer uma deformação, [22] que pode ser elástica (retirando a carga, o corpo volta ao comprimento original), ou plástica (permanente).

A tensão sofrida pelo corpo de prova é dada pela equação abaixo:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (8)$$

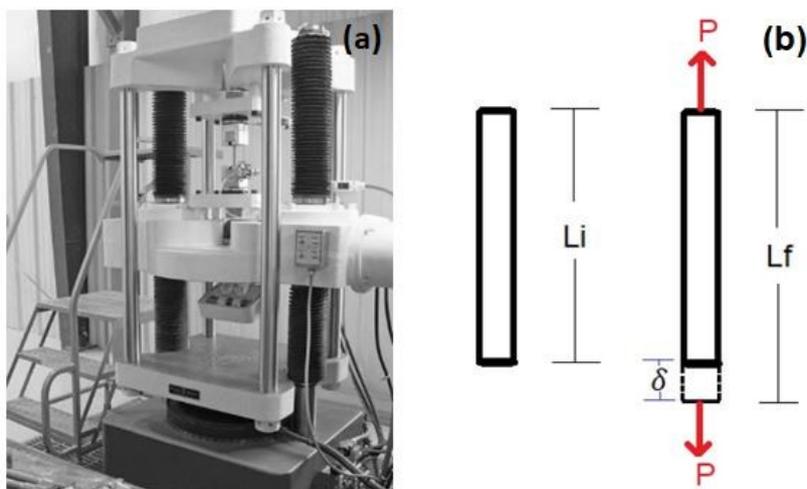
Onde:

**P:** carga axial [N]

**A:** área transversal [ $mm^2$ ]

**$\sigma$ :** tensão [MPa]

A Figura 20 abaixo mostra uma máquina típica de ensaios de tração e um esquema representando um corpo de prova antes e depois do ensaio, para melhor visualização.



**Figura 20.** a) máquina de tração e b) corpo de prova antes e depois [adaptado de 22].

A deformação  $\varepsilon$  sofrida pelo corpo de prova se dá pela equação abaixo,

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_i} \quad (9)$$

onde:

$\varepsilon$ : deformação [adimensional]

$\delta$ : variação de comprimento  $L_f - L_i$  [mm]

$L_i$ : Comprimento inicial [mm]

### 2.6.2. Gráfico Tensão x Deformação

A partir disso, pode-se obter o diagrama tensão x deformação, plotando  $\varepsilon$  x  $\sigma$ , apresenta na Figura 21.

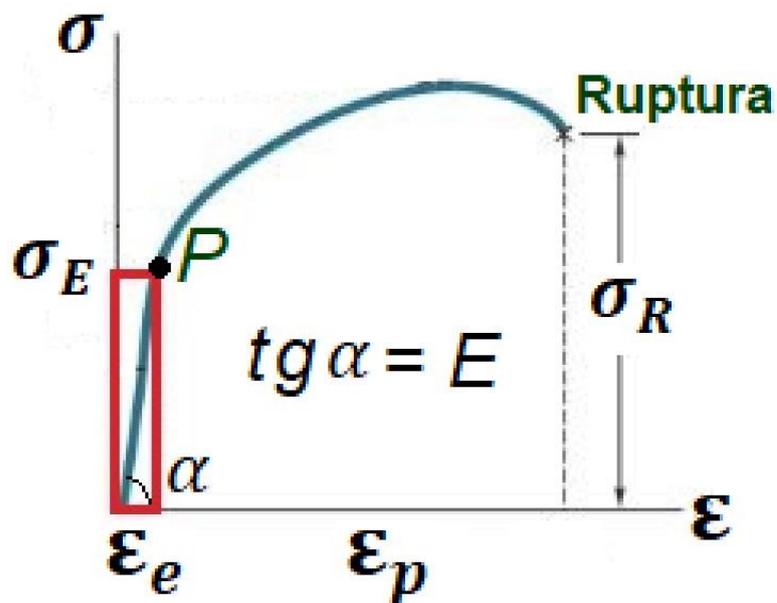


Figura 21. Gráfico tensão x deformação [adaptado de 22].

A Figura 21 mostra  $\epsilon_e$  e  $\epsilon_p$ , que representam, respectivamente, as deformações elástica e plástica do corpo de prova.

O corpo inicialmente se deforma linearmente, na região elástica. Após isso, a medida que a tensão vai aumentando, o corpo começa a sofrer *estricção*, ou seja, a área da seção transversal vai *diminuindo* de forma tal até que o mesmo se rompa, atingindo então neste momento a chamada *tensão de ruptura*,  $\sigma_R$  no gráfico.

A tensão que divide a parte elástica da plástica chama-se *tensão de escoamento*  $\sigma_E$ , ou seja, para valores acima dela o corpo começa a se deformar plasticamente, obtendo sempre uma deformação permanente, após a retirada da carga.

Na parte linear do gráfico destacada em vermelho, onde o corpo se deforma elasticamente, o gráfico obedece, até o ponto P, a chamada **lei de Hooke**. [23] Nela, a tensão e a deformação são diretamente proporcionais, e a fórmula se encontra abaixo.

$$\sigma = E \epsilon \quad (10)$$

Onde

$\sigma$ : tensão

$E$ : módulo de elasticidade do material ou módulo de Young.

$\epsilon$ : Deformação

## 2.7. Extensômetros

Os extensômetros [24] são capazes de medir diretamente o alongamento de um corpo de prova durante a aplicação de uma dada carga.

Com eles, é possível obter os valores das tensões e deformações durante um determinado ensaio mecânico, podendo ser possível obter o gráfico tensão x deformação, muito importante para análises mecânicas da amostra.

Os extensômetros [25] mais tradicionais e usados atualmente são os que utilizam técnicas de contato direto na amostra de teste, como, por exemplo os *Clip-*

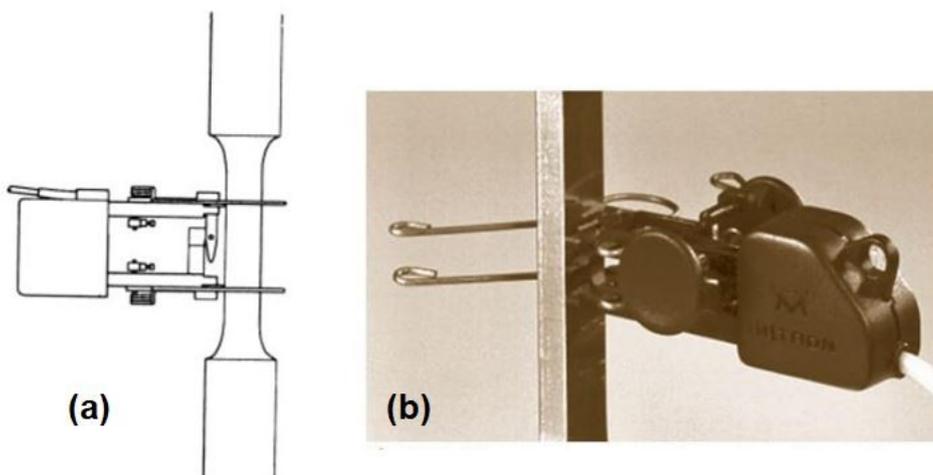
on Gages e os *Strain-Gages*. Porém, extensômetros ópticos sem contato direto vêm sendo cada vez mais usados e desenvolvidos.

### 2.7.1. Clip-On Gage

Os extensômetros Clip-On [25] são utilizados em contato direto com a amostra de teste, não sendo recomendáveis quando o material a ser utilizado for de longa extensão. Os Clip-On gages estão muito presentes em ensaios que envolvam materiais rígidos, como, por exemplo, metais e compósitos.

Estes extensômetros possuem duas pontas em sua extremidade, que atuam como garras que se prendem ao corpo de prova e definem o comprimento que será envolvido na medição. Estas duas extremidades são afiadas e a fixação na amostra é feita através de mola ou alguma pequena peça de metal, no intuito de evitar que o extensômetro escorregue durante o ensaio. Elásticos também podem ser utilizados para reforçar esta fixação.

A Figura 22 mostra uma esquematização de um típico extensômetro Clip-On e um exemplo real do mesmo.



**Figura 22.** a) Esquematização de um Clip-On [24], b) Exemplo real [25].

Os Clip-On gages possuem um transdutor, para tornar a medição da extensão do corpo de prova possível. Os transdutores mais comumente usados para serem integrados a um extensômetro Clip-On são os chamados Strain-Gages, por serem compactos e leves, o que torna o seu uso simples.

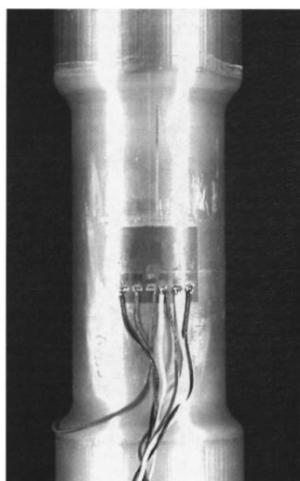
### 2.7.2. Strain-Gages

Strain-Gages [24] são extensômetros leves e compactos que são colados na superfície do material, onde será medida a deformação, dado um certo carregamento.

Eles funcionam como um adesivo eletricamente condutivo que possui um fio resistivo. A resistência é alterada sempre que o corpo de prova sofrer algum alongamento, seja ele por tensão, compressão, torção ou flexão. Ou seja, são mandados sinais elétricos que são interpretados e transformados em deformação (Strain).

A total higienização da superfície do material antes do Strain-gage ser colado é fundamental, para que a resposta recebida no final do teste seja encontrada com a maior precisão possível.

A Figura 23 mostra um Strain-gage em uso durante um ensaio mecânico, preso diretamente a um corpo de prova.



**Figura 23.** Strain-Gage colado no corpo de prova [24].

### **3. Metodologia**

Nesta seção serão detalhados toda a metodologia, materiais e aparato experimental utilizados durante este trabalho de conclusão de curso.

#### **3.1. Teste de Flexão**

Primeiramente foi escolhido como tipo de teste a ser realizado o teste de flexão em quatro pontos, sendo necessário primeiramente a projeção dos corpos de prova. O primeiro passo foi a escolha do material.

##### **3.1.1. Material**

O material utilizado para a realização deste trabalho consiste em corpos de prova, sensores a fibra óptica Rede de Bragg, máquina de ensaios de flexão e adesivos. Abaixo encontram-se subseções para cada um deles.

##### **3.1.2. Corpo de prova**

O primeiro passo a ser dado foi a projeção do corpo de prova, isto é, determinar por meio de normas e cálculos, suas dimensões.

O material utilizado para fazer o corpo de prova foi o aço SAE 1020 um aço ao carbono com excelente plasticidade e soldabilidade e ótima relação custo-benefício, se comparado com os demais aços.

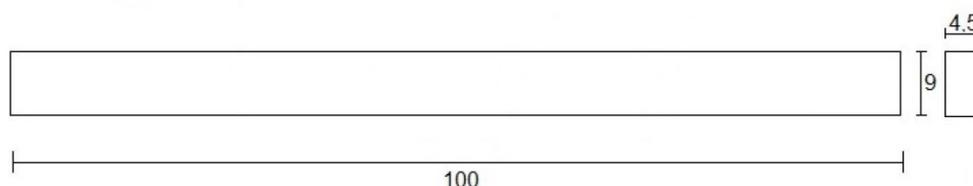
Este aço é bastante utilizado em projetos de engenharia, principalmente porque apresenta facilidade na hora da soldagem, e a razão disto está em sua microestrutura. Ao soldar outros aços como o aço 4340, por exemplo, este por sua vez pode ter martencita em sua região termicamente afetada, tornando-a fragilizada. As taxas de resfriamento do aço SAE 1020 ao ser soldado não são consideradas tão altas, o que dificulta a formação de martencita.

Outra vantagem deste aço está no fato de que se pode dobrar sua resistência alterando seu processo de fabricação, sem perder soldabilidade, devido à sua propriedade de aço de baixo carbono.

O aço SAE 1020 possui módulo de elasticidade de 200 GPa, e limite de escoamento de 350 MPa.

As dimensões para o corpo de prova foram tomadas baseando-se na norma ASTM E290 – 14. De acordo com a seção 7 “Amostra de teste” da norma, a relação entre a largura e a espessura do corpo de prova deveria ser de 2:1. Sendo assim, primeiramente consideramos o corpo de prova com as dimensões iniciais abaixo.

De acordo com a seção 7 “Amostra de teste” da norma, a relação entre a largura e a espessura do corpo de prova deveria ser de 2:1. Sendo assim, primeiramente consideramos o corpo de prova com as dimensões iniciais presentes na Figura 24.



**Figura 24.** Dimensões iniciais do corpo de prova.

Nesta etapa, o objetivo inicial era apenas verificar se o corpo de prova caberia de fato no suporte da máquina, para então fazer os cálculos necessários e concluir se tais medidas seriam possíveis ou não. Caso afirmativo, o próximo passo seria a usinagem dos corpos de prova para, então, começar os testes de fato. Ou seja, só mandar para a usinagem depois deste teste, já que neste trabalho seriam usados vários corpos de prova.

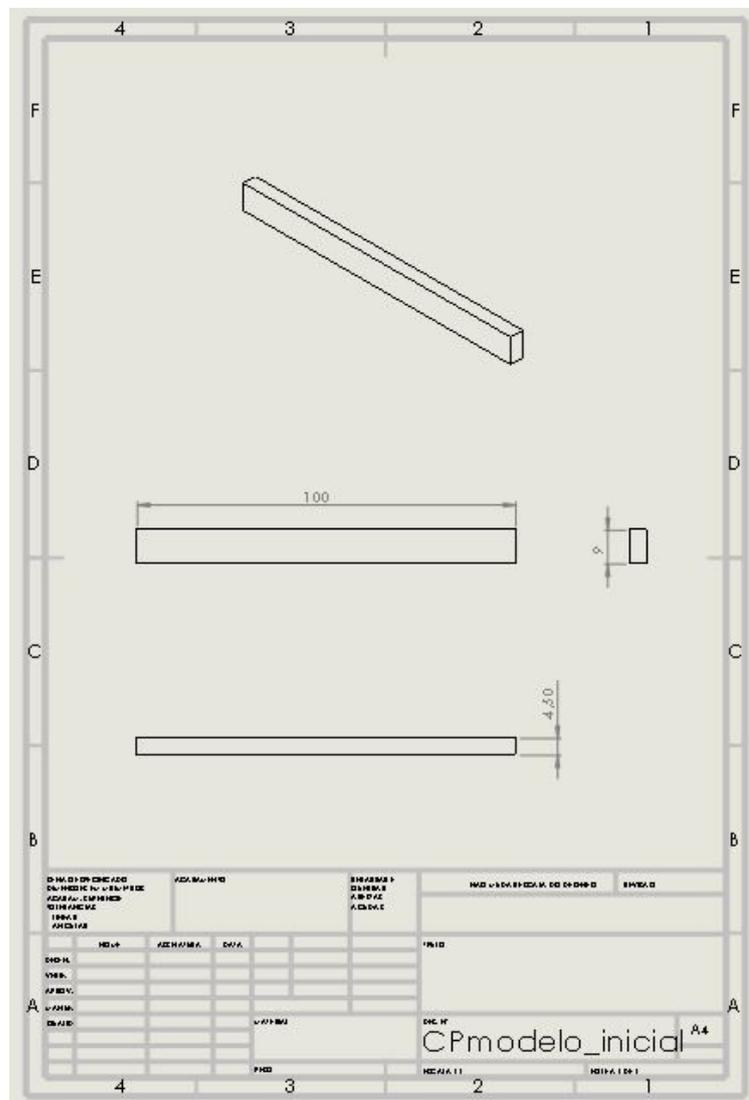
Foi utilizada a Equação 6 para calcular, com as dimensões iniciais escolhidas e a força máxima que seria utilizada (600 N), a tensão máxima do corpo de prova e a deformação máxima dele e da fibra óptica que nele seria colada junto com o sensor a Rede de Bragg.

Foram considerados  $M_{máx} = Pa = 300.25$ , altura  $h = 4,5 \text{ mm}$  e largura  $b = 9 \text{ mm}$ .

Com isso, foi obtida uma tensão máxima de, aproximadamente, 246,91 MPa, e foi considerado um fator de segurança igual a 1,2.

Utilizando a Equação 10, foi calculada uma deformação máxima de, aproximadamente, 1234,55  $\mu\epsilon$ . Ou seja, menor do que a deformação máxima que a fibra óptica suporta, aproximadamente 6000  $\mu\epsilon$ . Sendo assim, estas medidas estavam adequadas para o projeto, e o próximo passo era a usinagem dos corpos de prova.

As dimensões iniciais do corpo de prova em milímetros encontram-se na Figura 25, feitas utilizando o programa *SolidWorks*. Este é apenas um modelo chamado de “modelo inicial”.



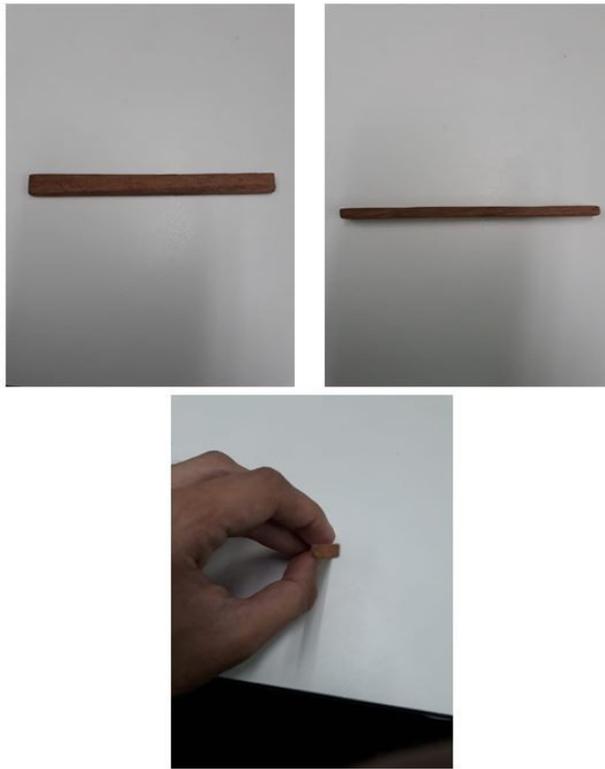
**Figura 25.** Dimensões iniciais do corpo de prova no SolidWorks.

Primeiramente foi utilizado um pedaço de madeira, mandando-o para a carpintaria da PUC, para o mesmo ser usinado com tais medidas.



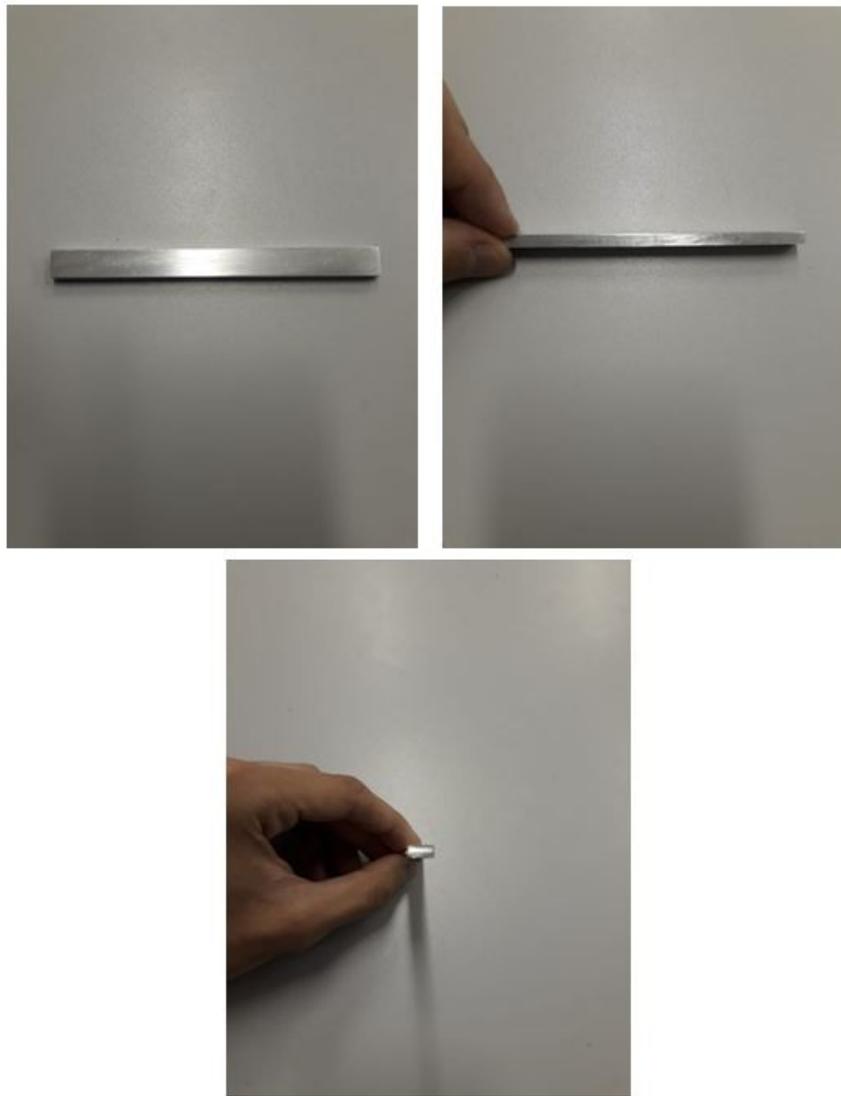
**Figura 26.** Pedaço de madeira utilizado.

A Figura 27 mostra o corpo de prova usinado na carpintaria da PUC.



**Figura 27.** Corpo de prova usinado de madeira.

Após isso, foi usinado na oficina do departamento de mecânica, um corpo de prova de alumínio, com as mesmas dimensões do “modelo inicial”, pois este seria melhor para ser testado nos suportes da máquina. O resultado pode ser visto na Figura 28.



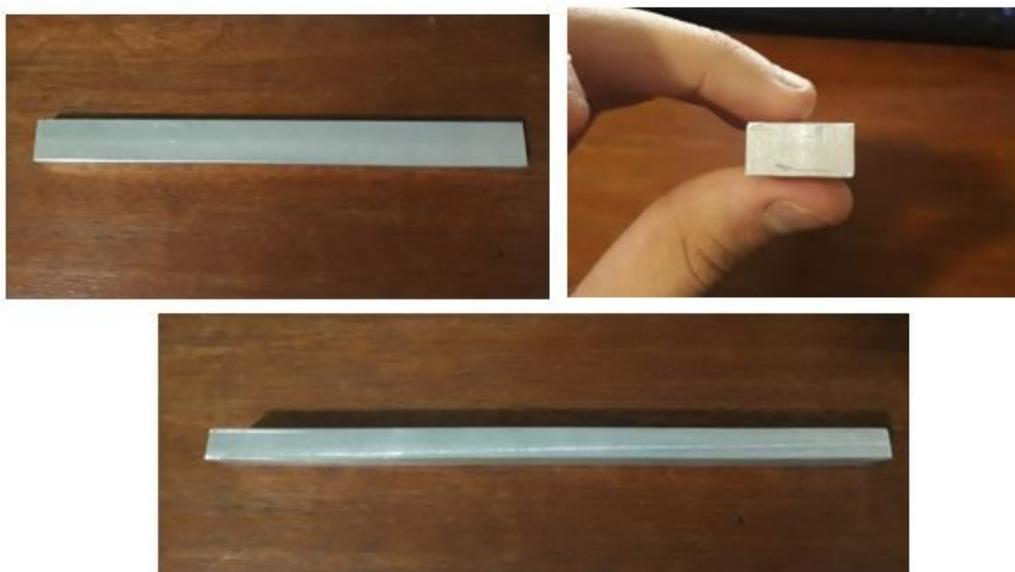
**Figura 28.** Corpo de prova de alumínio.

No mesmo dia os dois corpos de prova foram recebidos, e foi escolhido o de alumínio para ser testado na máquina.

Após testá-lo no suporte da máquina de flexão, verificou-se que ele servia apenas para testes de flexão em 3 pontos, mas não para este trabalho que utilizaria teste de flexão em 4 pontos. Sendo assim, ambos foram descartados e foi preciso usinar um novo corpo de prova com as dimensões necessárias para o suporte da máquina. Vale lembrar que este teste das dimensões na máquina foi importante para reduzir a perda e descarte futuro de corpos de prova.

Foi pensado em um terceiro corpo de prova, cujas dimensões fossem o dobro das dimensões do corpo de prova inicial, para caber devidamente nos suportes da máquina. Foi refeito mesmo processo do início desta seção, porém considerando a força máxima de 1000 N,  $M_{máx} = Pa = 500.50$ , altura  $h = 9\text{ mm}$  e largura  $b = 18\text{ mm}$ . A deformação máxima encontrada foi de, aproximadamente 1234,55  $\mu\epsilon$ , ainda abaixo de 6000  $\mu\epsilon$ . Ou seja, estas dimensões podem ser utilizadas e o corpo de prova poderia então ser usinado.

A Figura 29 mostra o corpo de prova com tais medidas, usinado na oficina do departamento de mecânica da PUC-Rio.



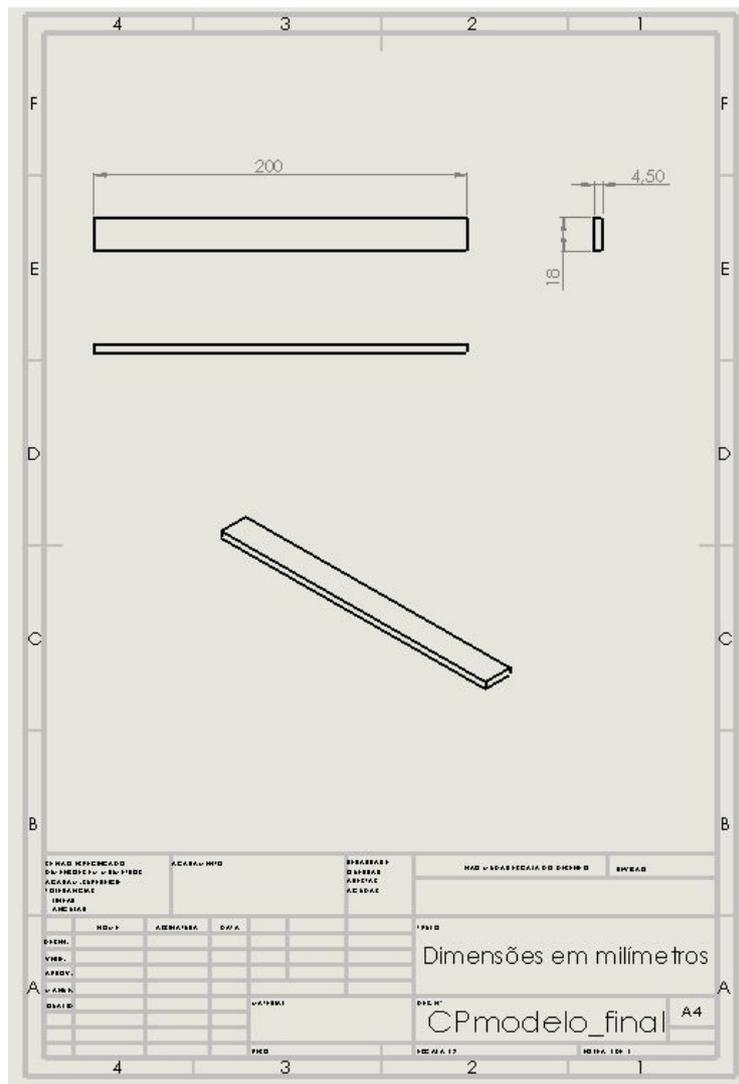
**Figura 29.** Corpo de prova com as medidas para o teste de flexão 4 apoios.

O corpo de prova com estas medidas havia sido tomado, a princípio, como o definitivo para os testes de flexão em 4 apoios. Porém, a espessura do corpo de prova foi considerada muito alta para os ensaios, então foi decidido que a mesma seria reduzida à metade.

Isto de início entrou em conflito com a norma ASTM E290 – 14, utilizada para projetar o corpo de prova. De acordo com esta norma, a espessura do corpo de prova deveria ser a metade da largura. Ou seja, a princípio um corpo de prova com largura 18 mm e espessura 4,5 mm não seria aceito. Porém, foi verificado que o

objetivo de tal norma era a projeção de corpos de prova para a caracterização do material que seria utilizado ao usinar, e como o objetivo dos ensaios deste trabalho não é o mesmo objetivo do presente na norma, pode-se fugir um pouco da mesma.

Sendo assim, ficou decidido que o corpo de prova final para os ensaios de flexão teria as dimensões apresentadas na Figura 30, feitas no programa SolidWorks.



**Figura 30.** Dimensões finais do corpo de prova para o teste de flexão 4 apoios.

## 3.2. Teste de Tração

Após complicações quanto à usinagem e custos de fabricação dos corpos de prova para o teste de flexão, o mesmo foi desconsiderado.

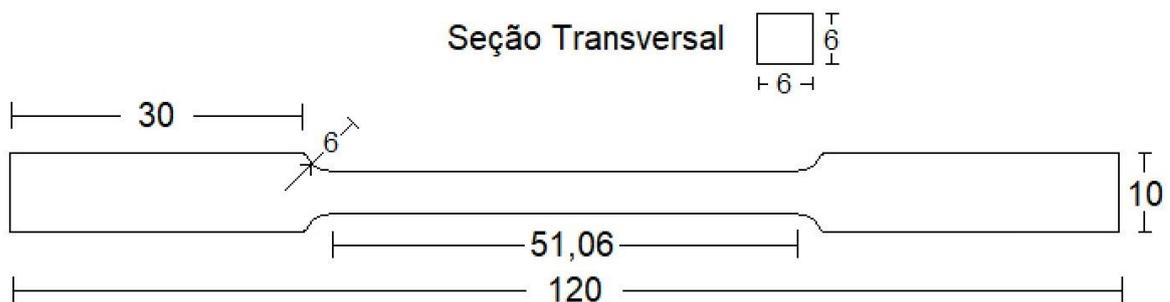
Após descartar a realização dos testes de flexão, foi decidido fazer teste de tração, com foco em altas temperaturas não antes exploradas neste tipo de teste, com o objetivo de estudar a capacitação dos adesivos a serem utilizados.

### 3.2.1. Material

Foram utilizados quatro corpos de prova disponíveis no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica (LSFO) da PUC-RIO, além do adesivo, fibra óptica, sensores a Rede de Bragg, e todo o aparato necessário, extensômetros do tipo Clip-On gage e máquina de tração.

### 3.2.2. Corpo de prova

Os corpos de prova foram todos feitos de aço 1020, cujo módulo de elasticidade é de 200 GPa. As dimensões dos mesmos se encontram na Figura 31.



**Figura 31.** Dimensões dos corpos de prova usados nos ensaios de tração.

### 3.2.3. Instrumentação dos corpos de prova

Nesta seção serão descritos o passo a passo de todo o processo de instrumentação dos corpos de prova, ou seja, o preparo necessário desde limpeza até estarem prontos para serem colocados na máquina de tração.

#### 3.2.3.1. Lixamento e Limpeza

Antes de colar os sensores a fibra óptica nos mesmos, foi preciso primeiramente lixá-los para deixar a superfície lisa e sem irregularidades.



**Figura 32.** Lixamento e preparo dos corpos de prova.

Após isto, foi necessário lavar os corpos de prova com água e álcool, e no final limpar com acetona, até o papel não ter mais nenhum resíduo visível, deixando a superfície pronta para a próxima etapa, que é a instalação dos sensores.



**Figura 33.** Finalização da limpeza dos corpos de provas com acetona.

Na Figura 34 encontram-se os corpos de prova limpos e prontos para receberem os sensores a redes de Bragg.



**Figura 34.** Corpos de prova devidamente limpos.

### 3.2.3.2. Instalação dos sensores nos corpos de prova

A próxima etapa foi posicionar os corpos de prova para, então, colocar as fibras ópticas com os devidos sensores a Rede de Bragg.

Para fixá-los foi utilizado fita Kapton, uma fita altamente resistente a temperaturas extremas, que pode ser vista na parte superior da Figura 35.



**Figura 35.** Corpos de provas posicionados.

Para colocar as fibras, foi antes preciso posicionar fitas isolantes o mais centralizado e paralelo possível, para os sensores serem colocados entre elas.



**Figura 36.** Preparação para colocar as fibras com os sensores.

Foram então colocadas cuidadosamente as fibras ópticas contendo os sensores em todos os corpos de prova. Novamente foi utilizada a fita Kapton, para colá-las.



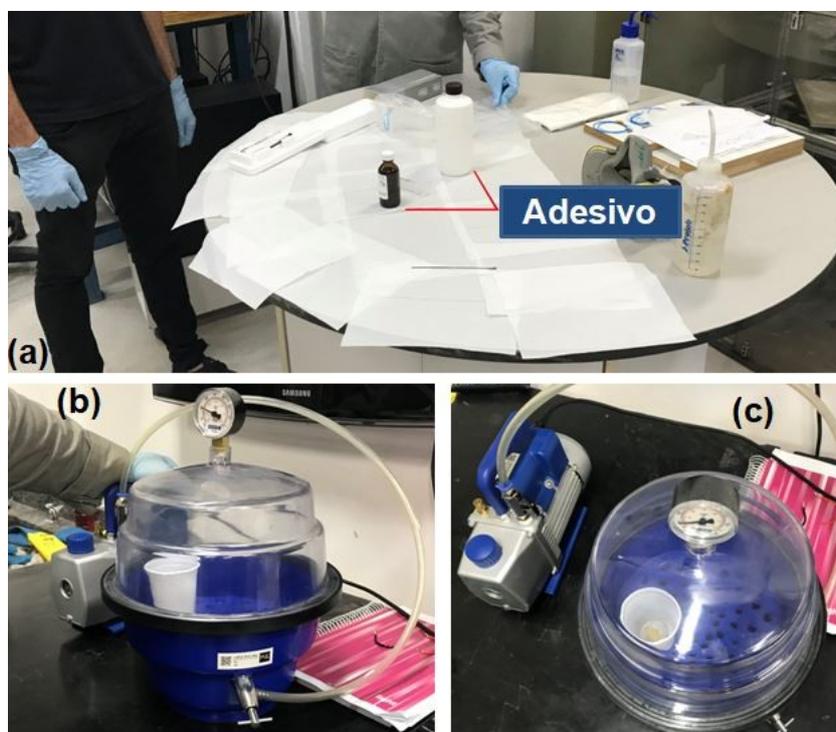
**Figura 37.** Corpos de prova com as fibras ópticas.

### 3.2.3.3. Colagem do adesivo e cura

A próxima etapa foi a colagem do adesivo. Primeiramente foi pego o adesivo na sua forma “inicial”, dividido nos dois frascos que se encontram na Figura 38. Para obter o adesivo que vai ser levado nos corpos de prova, primeiro mistura-se os dois elementos de cada frasco, e o resultado é colocado numa máquina de vácuo.

O objetivo desta máquina é retirar as possíveis bolhas de ar provenientes da mistura feita anteriormente. O adesivo é então deixado nesta máquina dentro de um recipiente por 3 horas.

Foi usado o mesmo adesivo nos quatro corpos de prova.



**Figura 38.** a) frascos contendo o adesivo, b) e c) adesivo na máquina de vácuo.

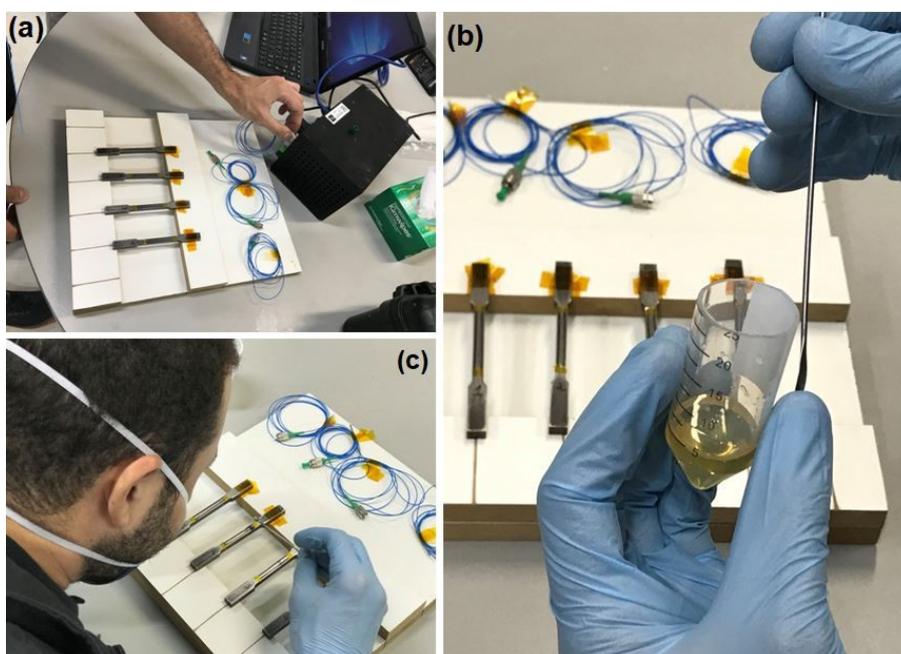
Foi retirado o adesivo da máquina e, antes de usá-lo, foram testados os sensores de cada corpo de prova no espectrômetro óptico (utilizando o MicronOptics, equipamento de leitura para redes de Bragg), para verificar se os mesmos estavam aptos a serem utilizados.

A Tabela 1 mostra o comprimento de onda refletido por cada sensor.

**Tabela 1.** Comprimento de onda refletido em cada sensor.

	Comprimento de onda (nm)
Sensor 1	1540,213
Sensor 2	1530,316
Sensor 3	1560,211
Sensor 4	1520,311

Após verificar que todos os sensores estavam medindo os sinais sem possíveis problemas provenientes da instrumentação, foi colocado o adesivo cuidadosamente com uma espátula nos quatro corpos de prova, para, então, serem levados à estufa, onde ficaram 2 horas a uma temperatura de 90°C.



**Figura 39.** a) teste dos sensores no Micron; b) coleta do adesivo; c) aplicação do adesivo.

A estufa é necessária para a cura do adesivo, ou seja, para deixar o adesivo finalmente pronto para o uso. Neste caso a cura foi feita através da aplicação de calor.



**Figura 40.** Corpos de prova na estufa para o processo de cura do adesivo.

Após 2 horas na estufa, os corpos de prova foram retirados da mesma, estando então finalmente prontos para serem usados nos testes. Na Figura 41 pode-se ver como ficou o adesivo após os corpos de prova serem retirados da estufa.



**Figura 41.** Pós estufa.

### 3.2.4. Ensaios de Tração

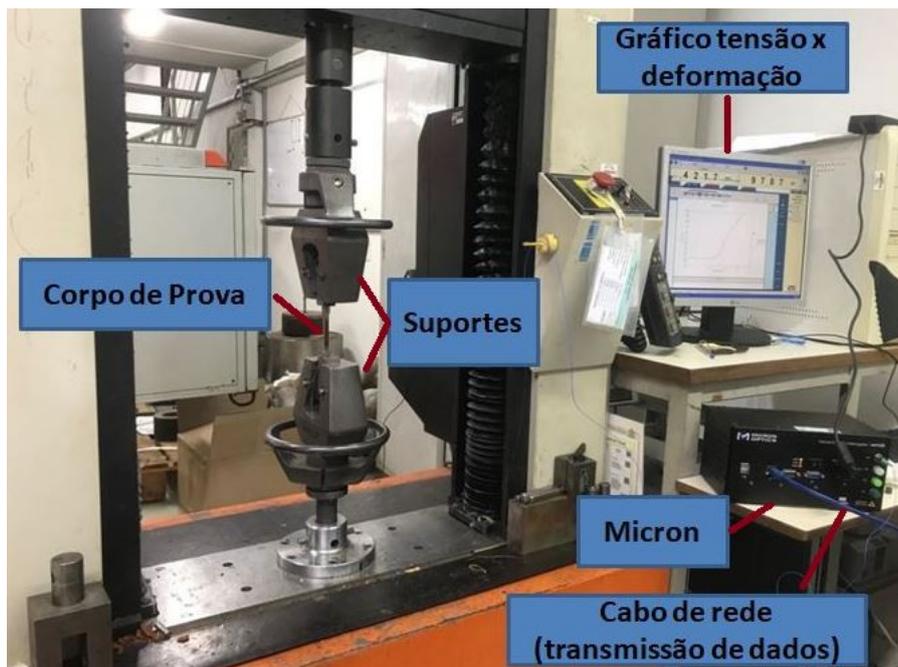
#### 3.2.4.1. Utilizando sensor a Rede de Bragg

Após a instrumentação dos corpos de prova, a etapa seguinte foi a realização dos ensaios de tração, feitos no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ITUC, na PUC-RIO. A máquina usada foi uma máquina de ensaios mecânicos do fabricante Instron, modelo 1125 e número de série 6233, que se encontra na Figura 42.



**Figura 42.** Máquina Instron utilizada nos ensaios.

Primeiramente foram feitos os testes de tração com dois dos quatro corpos de prova instrumentados com um sensor a Rede de Bragg. Para isto, foi utilizado o aparato experimental presente na Figura 43.



**Figura 43.** Aparato experimental.

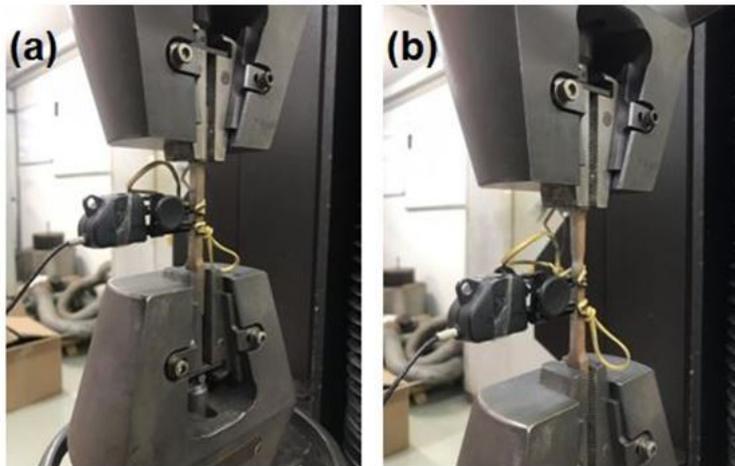
A velocidade do travessão (suporte) da máquina usada foi de 1mm/min, sendo que a princípio o fim dos testes se daria quando os corpos de prova se rompessem, mas a partir de uma certa força o sensor já não detectava mais nada, então o teste foi finalizado antes do corpo de prova de fato se romper.

O foco do teste esteve na atuação do sensor a fibra óptica quando o corpo de prova se deformava plasticamente, principalmente logo antes do sensor não detectar mais nada. Nesta etapa, foram feitos dois ensaios de tração utilizando dois corpos de prova.

### **3.2.4.2. Utilizando Clip-Gage**

Assim como os ensaios feitos com os sensores a Rede de Bragg, os ensaios utilizando Clip-On gage foram feitos no mesmo laboratório, com a mesma máquina e velocidade do suporte. Nesta etapa foram utilizados dois corpos de prova, cada um com um sensor do tipo Clip-Gage. Ambos os ensaios de tração foram finalizados com a ruptura dos corpos de prova.

A Figura 44 mostra o corpo de prova com o Clip-Gage no início e no momento em que o corpo de prova começa a sofrer estricção, momentos antes do mesmo de romper.



**Figura 44.** a) Início do teste, b) estrição prévia à ruptura.

A Figura 45 mostra o mesmo para o segundo corpo de prova. Percebe-se que agora a estrição se deu próxima ao elástico superior.



**Figura 45.** a) Início do teste, b) estrição prévia à ruptura

## 4. Resultados e discussões

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada teste de tração realizado. Para entender os gráficos e todas as conclusões, segue na **Tabela 2** a legenda de cada corpo de prova e sua respectiva sigla.

**Tabela 2.** Identificação dos corpos de prova.

	Tipo de sensor	Sigla
Corpo de prova 1	Rede de Bragg	CP 1
Corpo de prova 2	Rede de Bragg	CP 2
Corpo de prova 3	Clip-On gage	CP 3
Corpo de prova 4	Clip-On gage	CP 4

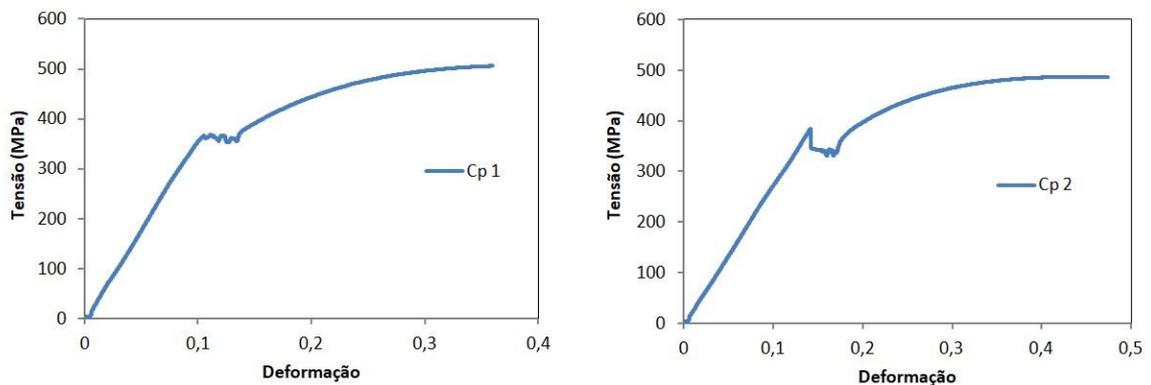
### 4.1. Dados da Instron

Nesta seção serão abordados os resultados obtidos pelo programa Excel, referentes aos ensaios de tração para os 4 corpos de prova.

#### 4.1.1. Teste com sensores a Rede de Bragg

Ambos os testes de tração feitos com os corpos de prova instrumentados com os sensores a Rede de Bragg foram finalizados antes do corpo de prova se romper. Isto porque, no ensaio do CP 1, a partir de uma certa força, o sensor se danificou, e no ensaio do CP 2 o adesivo se descolou do corpo de prova.

A Figura 46 mostra os gráficos Tensão x Deformação para os dois corpos de prova instrumentados com Redes de Bragg, obtidos através o programa Excel, cujos dados foram tirados pela máquina de ensaios mecânicos da Instron.



**Figura 46.** Gráficos Tensão x Deformação para os dois CPs instrumentados com Redes de Bragg.

Nos gráficos, pode-se observar que nenhum corpo de prova foi levado à ruptura, mas que escoaram, ou seja, sofreram deformações plásticas permanentes.

#### 4.1.1.1. Corpo de prova 1

Até aproximadamente uma tensão de 368,7 MPa e força de 13273 N, o corpo de prova se deforma apenas elasticamente, entrando numa zona elástico-plástica, quando então começa a escoar e se deforma plasticamente.

A tensão máxima que o corpo de prova conseguiria aguentar antes de se romper não foi atingida durante o teste, o que pode ser visto no final do gráfico, onde o mesmo termina antes de começar, de fato, a decair.

Como foi dito anteriormente, o ensaio foi finalizado quando o sensor a Rede de Bragg se danificou e não mais media corretamente, e, após o final do teste, o sensor e os adesivos permaneceram intactos, o que pode ser visualizado na Figura 47.



**Figura 47.** CP e adesivo intactos após o final do teste.

#### **4.1.1.2. Corpo de prova 2**

Até aproximadamente uma tensão de 384,4 MPa e força de 13854,5 N, o corpo de prova se deforma apenas elasticamente, entrando numa zona elástico-plástica, onde fica sob uma tensão média de 337 MPa, quando então começa a escoar e se deforma plasticamente, com a tensão subindo.

Diferente do ensaio anterior (CP1), neste ensaio (CP2) a tensão máxima que o corpo de prova conseguiria aguentar antes de se romper foi atingida durante o teste, pois analisando o gráfico e os dados, no pico do gráfico a tensão fica praticamente constante e deixa de aumentar, comportamento que é esperado antes da mesma começar a decair até o momento em que a tensão atinge o valor de tensão de ruptura do corpo de prova.

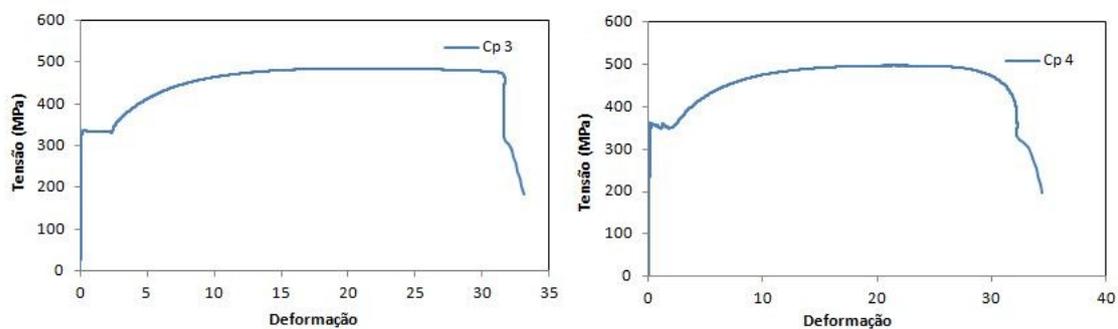
Este ensaio foi finalizado quando o adesivo junto com a fibra óptica e o sensor se descolou do corpo de prova, o que pode ser visto na Figura 48. Conclusões referentes ao fato do adesivo se descolar do corpo de prova serão abordadas mais à frente.



**Figura 48.** Adesivo e fibra óptica descolados do CP.

#### **4.1.2. Teste com sensores Clip-On Gage**

Os ensaios de tração utilizando os sensores Clip-On Gage foram finalizados quando ambos os corpos de prova se romperam. A Figura 49 mostra os gráficos Tensão x Deformação dos mesmos.



**Figura 49.** Gráficos Tensão x Deformação dos CPs instrumentados com o Clip-Gage.

#### 4.1.2.1. Corpo de prova 3

Analisando os dados e os gráficos na Figura 49, percebe-se que o CP 3, ao longo do ensaio, foi submetido a uma tensão máxima de 485,17 MPa e força de 17468,74 N, e no final seu alongamento total foi de 33,1246.

A Figura 50 mostra o CP 3 rompido no final do ensaio, quando o mesmo estava sob uma força de aproximadamente 11650 N. Percebe-se que o local da ruptura foi bem próximo ao local onde a garra do Clip-On gage foi colocado.



**Figura 50.** CP 3 rompido pós-teste.

#### 4.1.2.2. Corpo de prova 4

Este corpo de prova (CP4), por sua vez, aguentou uma tensão máxima maior que o CP 3, de 487,17 MPa, com força de 17898,28 N. Ao final do ensaio, sua deformação total foi de 34,3684.

O teste foi finalizado quando o mesmo se rompeu, sob uma força de aproximadamente 12020 N. É possível ver na Figura 51 o local da ruptura.

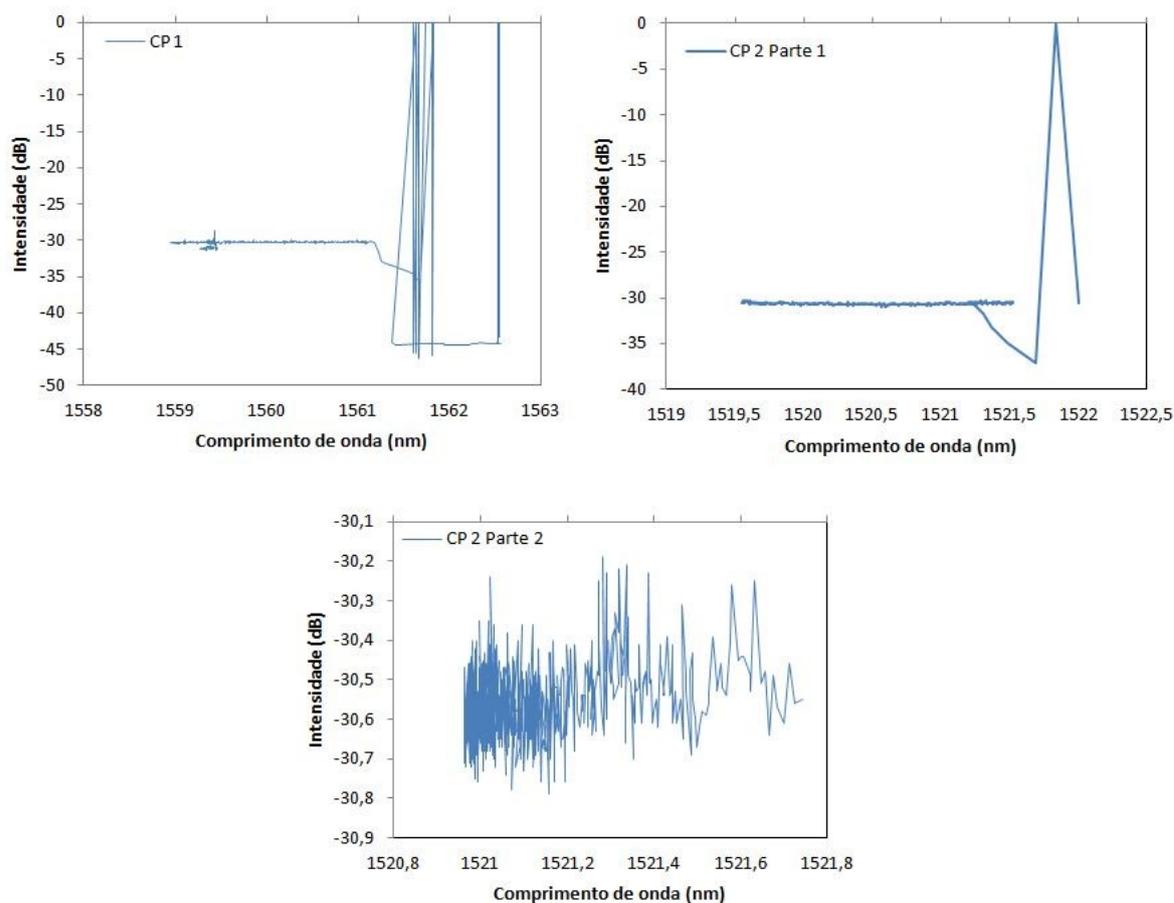


**Figura 51.** CP 4 rompido pós-teste.

## **4.2. Dados do Espectrômetro Óptico (MicronOptics)**

Nesta seção serão abordados os resultados obtidos com o equipamento de leitura de Redes de Bragg, o espectrômetro do fabricante MicronOptics, referentes aos ensaios de tração para os dois primeiros corpos de prova (CP 1 e CP 2), que foram instrumentados com os sensores a Rede de Bragg. Ou seja, serão apresentados os resultados do que os sensores mediram ao longo dos ensaios.

A Figura 52 mostra os ensaios, com as potências e comprimentos de onda envolvidos, dos dois corpos de prova, obtidos pelo programa Excel, e utilizando os dados salvos ao longo do teste através do Micron.



**Figura 52.** Leitura dos sensores durante os ensaios dos dois CPs.

Analisando o resultado para o ensaio do CP 1, percebe-se que o sensor se comportou, até antes de perder o sinal, dentro do esperado ao longo de todo o ensaio. Vale ressaltar que o sensor se danificar em algum momento também era algo a ser esperado, mas não desejado, ou seja, a intenção era o CP se romper, mas, até antes disso, o sensor atuar bem.

No final da Parte 1 do ensaio do CP 2, o sensor já havia perdido o sinal, mas o sinal foi recuperado logo depois e foi dada continuidade ao ensaio (Parte 2), na tentativa de continuar utilizando o sensor para forças ainda maiores e testar se o sensor conseguiria de fato atuar com sucesso até o corpo de prova se romper.

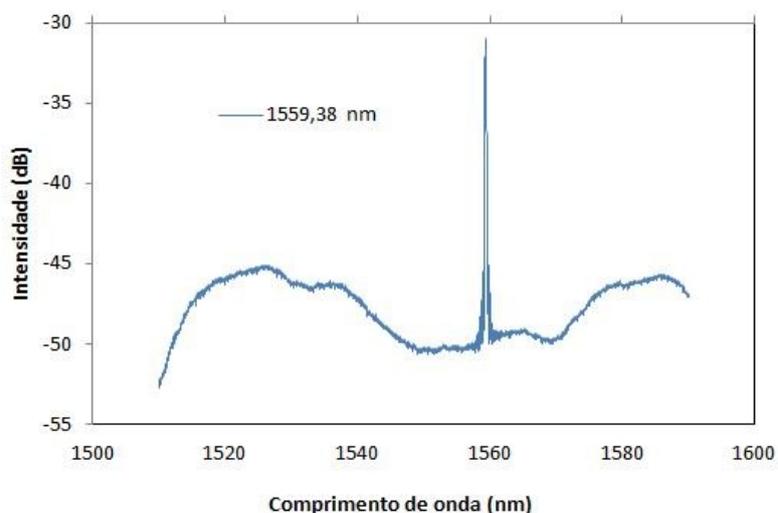
Analisando o gráfico da segunda parte do ensaio do CP 2, percebe-se que o sensor já não detectava mais nada a não ser ruídos. Ou seja, o sensor não funcionou de forma correta para toda esta parte.

## 4.2.1. Análise dos espectros de luz

Nesta seção serão apresentados os espectros de luz salvos em vários momentos dos ensaios, através do Micron. Com eles, é possível fazer comparações, discutir a atuação dos sensores a Rede de Bragg como sensor de deformação e analisar para que forças os sensores atuam bem ou não.

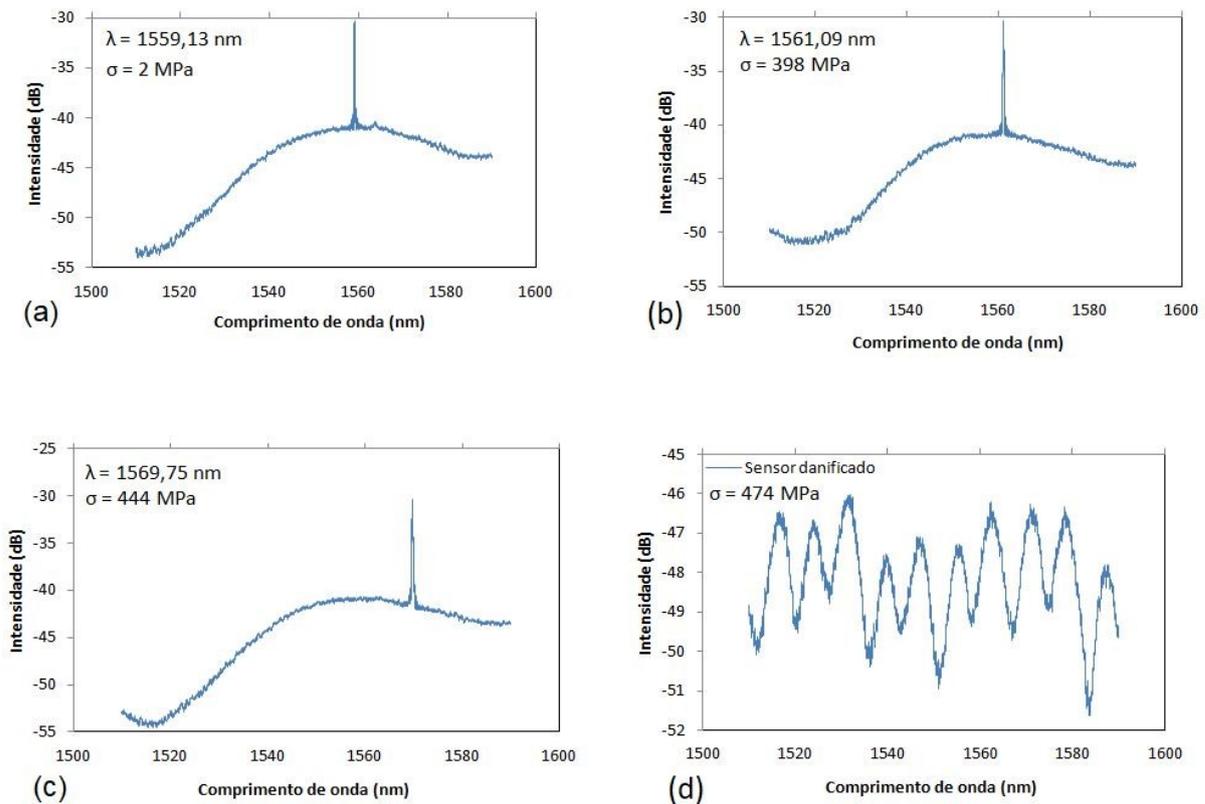
### 4.2.1.1. Corpo de prova 1

A Figura 53 mostra o pico, em nanômetros, do espectro de luz medido pelo sensor a Rede de Bragg antes do ensaio de tração ser iniciado. Ou seja, indica para que valor de comprimento de onda têm-se o maior valor de potência (intensidade), antes da aplicação das forças. Vale ressaltar que neste momento apenas pré-cargas provenientes dos suportes da máquina atuavam no CP.



**Figura 53.** Espectro de luz antes do início do teste.

A Figura 54 mostra como o pico de cada gráfico se alterou, à medida que as tensões foram aumentando ao longo do teste.



**Figura 54.** Espectros capturados na a) fase elástica b) início do escoamento c) escoamento d) sensor sem medir mais deformação.

A seguir, seguem análises referentes a cada gráfico.

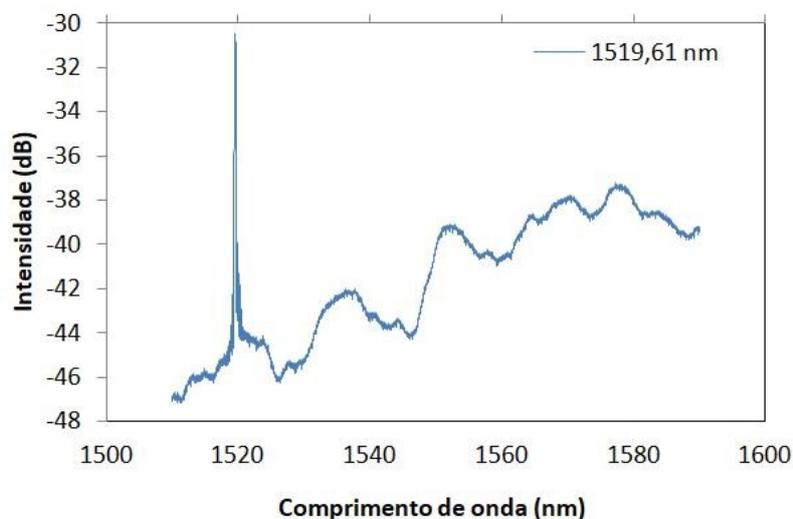
- Espectro capturado exatamente no início do teste de tração, com pico de 1559,13 nm e potência de -30,33 dB. Neste momento, o corpo de prova ainda está se deformando apenas elasticamente. A força atuando no corpo de prova é de 73,48 N, e uma tensão de 2,04MPa. Esta força é considerada bastante baixa, e o sensor atua dentro do esperado. Ainda não era esperado um comportamento peculiar do mesmo.
- Espectro capturado 7 minutos após o início do teste, com pico de 1561,09 nm e potência de -30,32 dB. Pode-se observar que o pico do comprimento de onda se deslocou para a esquerda. Este comportamento já era esperado, pois a medida que a deformação vai aumentando, o pico apresenta este deslocamento.

Ou seja, até este momento, onde o corpo de prova já começou a escoar e está sendo tracionado com uma força de 14335,41 N e tensão de 398,51 MPa, o sensor atua dentro do esperado.

- c) Espectro capturado 9 minutos após o início do teste, com pico em 1569,75 nm e potência de -30,35 dB. O corpo de prova está se deformando plasticamente, com força atuante de 15987,25 N e tensão de 444,09 MPa. Pode-se verificar mais um vez que o pico se desloca novamente para a direita e tudo segue dentro do esperado.
- d) Espectro capturado 11 minutos após o início do teste. Neste momento, a força atuante é de 17084,86 N e a tensão 474,58 MPa. O corpo de prova está se deformando plasticamente, porém, como pode ser observado, o sensor já não atuava mais corretamente, e o que se vê no gráfico são apenas ruídos. Ou seja, deste momento em diante o sensor não servia mais para o teste, fato que fez o ensaio de tração ser finalizado, antes do corpo de prova se romper.

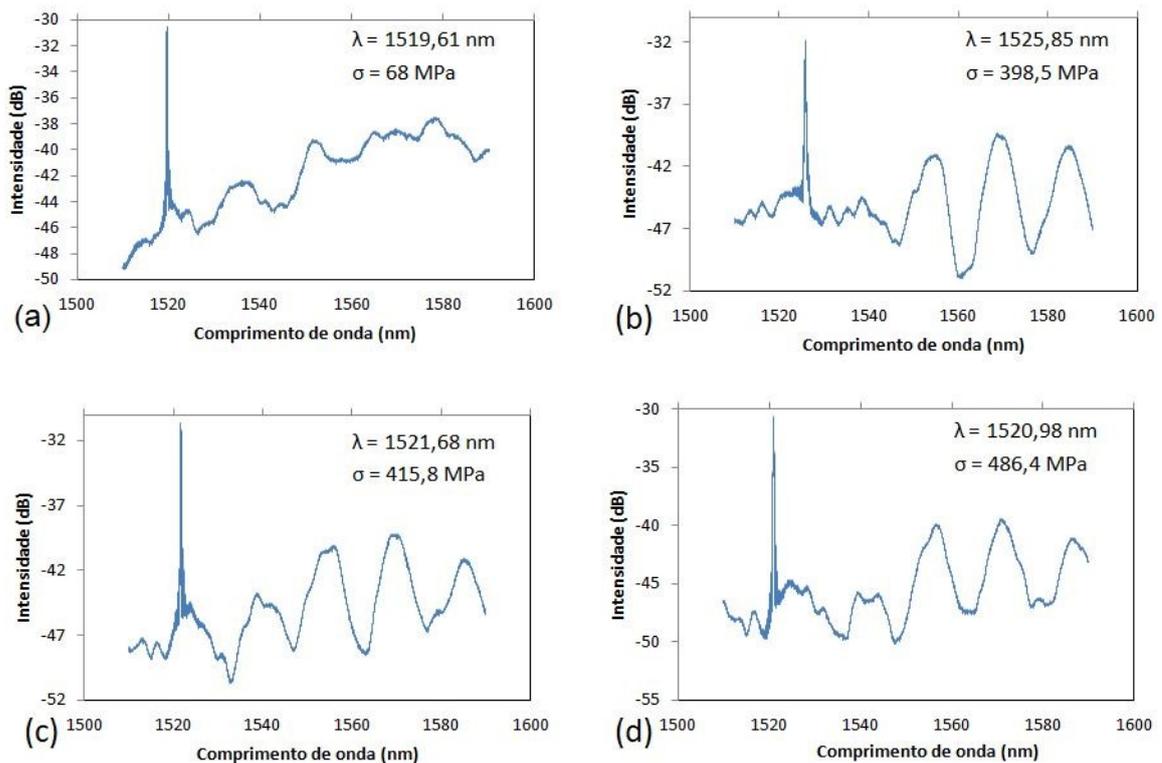
#### 4.2.1.2. Corpo de prova 2

A Figura 55 mostra o pico do espectro medido pelo sensor, antes de se iniciar o teste de tração.



**Figura 55.** Espectro antes do ensaio de tração começar.

Percebe-se que o sensor estava atuando dentro do esperado e conseguiu com sucesso detectar o sinal, o que possibilitou a realização do ensaio de tração. Este tipo de verificação prévia ao início do teste é fundamental para que os dados salvos estejam corretos e possam ser depois analisados. Os espectros medidos pelo sensor, salvos ao longo de todo o ensaio, se encontram para análise na Figura 56.



**Figura 56.** Espectros em a) fase elástica b) fase plástica c) fase plástica d) final do teste.

Analisando cada gráfico separadamente:

a) Espectro capturado 1 minuto e 41 segundos após o início do teste, com pico em 1519,61 nm e potência de -30,56 dB. A força atuante é de 2450,05 N e tensão de 68,05 MPa. O corpo de prova está se deformando apenas elasticamente e o sensor atua como o esperado, ressaltando o ponto de maior potência.

b) Espectro de 9 minutos após o início do ensaio. O pico de comprimento de onda está em 1525,85 nm com intensidade de -31,87 dB. A força atuando

no corpo de prova é de 14345,25 N e tensão 398,47 MPa. Corpo de prova nesta etapa já está apresentando deformações plásticas, e até o momento o sensor não apresenta comportamento inesperado. Como pode-se observar, novamente o pico do gráfico foi deslocado para a direita e agora está em um valor mais alto de comprimento de onda.

- c) Gráfico do espectro salvo 10 minutos após o início do teste. Corpo de prova na zona plástica. Porém nota-se que o pico se deslocou para a esquerda, estando agora em 1521,68 nm com potência de -30,64 dB. Neste momento, o corpo de prova está na parte 2 do ensaio de tração, referente a tudo após o momento em que o sensor perde o sinal. O sensor foi “forçado” ao extremo para recuperar o sinal (pode-se tentar recuperar o sinal através do Micron), e percebe-se que o comportamento inesperado em que o pico de comprimento de onda se desloca para a esquerda para um valor menor, é consequência de ter-se forçado o sensor, quando ele não mais era capaz de atuar como sensor de deformação. Devido à alta carga, aqui ele já não está mais medindo corretamente, o que pode ser compreendido visto que neste momento o adesivo junto com o sensor já havia descolado do corpo de prova. A força atuando era de 14967,58 N e a tensão 415,76 MPa.
- d) Para comprovar que o sensor não estava mais medindo dentro do esperado, capturou-se este espectro um pouco antes do ensaio finalizar, 21 minutos após o início do mesmo. O pico de comprimento de onda se deslocou novamente para a esquerda, estando agora em 1520,98 nm e intensidade -30,62 dB. A força atuando é de 17508,74 N e tensão de 486,35 MPa. O corpo de prova está na fase plástica e o sensor, como citado anteriormente, está descolado do corpo de prova, o que já é suficiente para o teste ser finalizado. Este último espectro foi apenas para comprovar este deslocamento do pico do comprimento de onda. Sendo assim, não havia mais necessidade de o ensaio prosseguir e o mesmo foi finalizado.

## 5. Conclusões

Comparando a atuação do sensor a Rede de Bragg com o extensômetro Clip-On Gage para ensaio de tração visando a ruptura do corpo de prova, concluiu-se que o Clip-On Gage é a melhor opção para este tipo de teste, pois é resistente o suficiente para atuar durante todo o ensaio, até o momento da ruptura do CP.

Diferente do Clip-On Gage, para utilizar o sensor a Rede de Bragg, uma instrumentação e preparação prévia do corpo de prova se faz necessária, onde o adesivo que irá colar o sensor ao corpo de prova deve ser cuidadosamente escolhido e instrumentado de forma tal a ser possível a realização do teste dentro dos conformes. Ou seja, o Clip-On Gage não só é mais resistente como a sua utilização é mais simples, e requer um menor aparato experimental, já que não é necessário nenhum programa extra de leitura de dados, como o Micron, por exemplo.

No entanto, o Clip-On Gage não pode ser utilizado em aplicações tais como o sistema MODA, devido às condições extremas no ambiente de instalação e à distância entre o ponto de medição e a superfície da plataforma. Por este motivo, o sistema MODA utiliza redes de Bragg.

Além disso, em relação à exatidão de dados, o sensor a Rede de Bragg apresentou melhores resultados, já que com ele é possível fazer análises e conclusões mais detalhadas referentes ao ensaio, por meio dos espectros de luz.

O sensor no CP 1 não mediu mais nada a partir de uma força de aproximadamente 17 kN. Já o sensor no CP 2 se danificou para uma força menor, de 15 kN. Sendo assim, o sensor do CP 1 apresentou melhores resultados. Esta diferença de comportamento pode ser consequência da instrumentação dos corpos de prova. Ou seja, desde o momento de lixar os corpos de prova, até o momento em que a fibra óptica foi colada com o sensor por meio do adesivo, que foi em seguida levado para o processo de cura, qualquer mínima diferença e imprecisão nestas etapas já compromete os resultados.

O adesivo utilizado estava na validade e foi curado utilizando o mesmo procedimento (com temperatura), nos dois corpos de prova. Sendo assim, o fato de o sensor instrumentado em um corpo de prova ter descolado, mas no outro não,

comprova mais uma vez que a instrumentação é essencial, mesmo para adesivos de boa qualidade.

Para testes de tração utilizando forças acima de 15kN, o sensor a Rede de Bragg não é recomendado, já que para forças maiores que esta, ambos os utilizados não detectaram mais nada. Porém, vale ressaltar que este valor de força para este tipo de teste já é considerado alto, então conclui-se que o sensor a Rede de Bragg é, de fato, um excelente sensor de medição de deformação.

Ao final do teste de tração, a deformação total sofrida pelo CP 1 foi de aproximadamente 0,350. A deformação do CP 2 foi de, aproximadamente, 0,475. Sendo assim, pode-se concluir que o adesivo se manteve colado para deformações do corpo de prova menores que 0,4.

Dentre os corpos de prova instrumentados com Rede de Bragg, o CP 1 apresentou resultados mais precisos, com gráficos mais limpos e com menos ruídos.

O adesivo utilizado neste trabalho mostrou ser eficiente não só para corpos de prova que se deformam elasticamente, como também para quando as forças presentes são suficientes para os mesmos escoarem, desde que as mesmas não ultrapassem valores de 15 kN, aplicadas sobre áreas transversais iguais a dos corpos de prova utilizados neste trabalho ( $36 \text{ mm}^2$ ). Se a área transversal for menor, deve-se diminuir a força para diminuir a tensão, para o adesivo não descolar.

O adesivo utilizado apresentou ótimos resultados à temperatura ambiente e pode ser utilizado em ensaios com temperaturas mais altas, desde que a instrumentação seja feita de forma cautelosa e correta em todos os detalhes.

Se os testes realizados fossem os mesmos, porém utilizando um adesivo curado sem a utilização de temperatura, espera-se que os resultados sejam diferentes. Isto é algo que, após a realização deste trabalho, ainda pretende ser estudado e verificado no laboratório onde eu estagio. O mesmo vale para ensaios com outros tipos de adesivos não antes utilizados.

## 6. Referências bibliográficas

1. JOSÉ MAURO DE MORAIS. ***Petrobras: Uma história das explorações de petróleo em águas profundas e no pré-sal.*** 1st ed. Elsevier; 2015
2. RUSSEL L. DEVEAU. ***Fiber Optic Lighting: A Guide for Specifiers.*** 2nd Edition. The Fairmont Press, INC; 2001
3. HECHT J. ***Understanding Fiber Optics.*** 3rd Edition. Charles E. Stewart J, Editor.
4. GERD KEISER. ***Comunicações por Fibras Ópticas.*** 4<sup>th</sup> Edition.
5. STEPAN S, EVGENY D, INGA A. ***Refractive indices of solids*** Springer; 2016
6. GOODMAN JW. ***Introduction to Fourier optics.*** 3<sup>rd</sup> Edition. Roberts & Co; 2005
7. PINHEIRO JMS. ***Redes ópticas de Acesso em Telecomunicações.*** Elsevier; 2019
8. DOWNING JN. ***Fiber-optic communications.*** Sandy Clark, Stephen Helba, Michelle Ruelos CC, editor. Thomson/Delmar Learning; 2005
9. BAKER DG. ***Monomode fiber-optic design with local-area and long-haul network applications.*** 1<sup>st</sup> Edition. Van Nostrand Reinhold; 1987
10. HUI R, O'SULLIVAN MS. ***Fiber optic measurement techniques*** Elsevier/Academic Press; 2009
11. SANTOS JL, FARAHI F, ABOLBASHARI M. ***Handbook of optical sensors.*** CRC Press, 2015.
12. DAUD S, ALI J. ***Fibre Bragg Grating and No-Core Fibre Sensors.*** Springer International Publishing; 2018.
13. PAL BP. ***Guided wave optical components and devices: basics, technology, and applications.*** Elsevier Academic Press; 2006
14. OU JP, LI H, DUAN ZD. ***Structural health monitoring and intelligent infrastructure.*** Taylor & Francis; 2006
15. CUSANO A, CUTOLO A, ALBERT J. ***Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation.*** Bentham Science Publishers; 2011
16. **Ouro Negro 2019** [Internet]. [cited 2019 Nov 10]. Available from: <http://ouronegro.com.br/>

17. **PASA - Physical Acoustics South America** [Internet]. [cited 2019 Nov 10]. Available from: [http://pasa.com.br/2016/offshore\\_risers.asp](http://pasa.com.br/2016/offshore_risers.asp)
18. ANTONIO PIZZI, KASHMIRI L. MITTA. **Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded** . 2nd ed. Marcel Dekker; 2003
19. D.A. DILLARD AVP. **Adhesion Science and Engineering: Surfaces, Chemistry and Applications**. 1<sup>st</sup> Edition. Elsevier; 2002
20. WALTER BROCKMANN, PAUL LUDWIG GEIß, JÜRGEN KLINGEN, K. BERNHARD SCHRÖDER . **Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology**. WILEY-VCH; 2009
21. GERE J, GOODNO B. **Mecânica dos Materiais**. 7th Ed. Cengage Learning; 2010.
22. FERDINAND P. BEER, E. RUSSELL JOHNSTON, JR., JOHN T. DEWOLF, DAVID. F. MAZUREK. **Mecânica dos Materiais** - 7<sup>a</sup> Edição. McGraw-Hill Global Education Holdings; 2014
23. E. RUSSELL JOHNSTON JR.; FERDINAND P. BEER; JOHN T. DEWOLF; AVID F. MAZUREK. **Estática e Mecânica dos Materiais**. McGraw-Hill Global Education Holdings; 2013
24. DAVIS JR. **Tensile Testing**. 2nd Ed. ASM International; 2004
25. SHARPE WN, editor. **Handbook of Experimental Solid Mechanics**. Springer; 2008