



Henrique Freire de Andrade Maselli Penna

Estudo da difusão do Hidrogênio em Fibras Ópticas

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga
Co-orientador: Dra. Sully Milena Mejía Quintero

Rio de Janeiro
Abril de 2013



Henrique Freire de Andrade Maselli Penna

Estudo da difusão do Hidrogênio em Fibras Ópticas

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dra. Sully Milena Mejía Quintero

Co-Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Manoel Feliciano da Silva Junior

Centro de Pesquisa e Desenvolvimento

Leopoldo Américo Miguês de Mello

Dra. Adriana Lúcia Cerri Triques

Centro de Pesquisa e Desenvolvimento

Leopoldo Américo Miguês de Mello

Dr. Luiz Carlos Guedes Valente

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Giancarlo Vilela de Faria

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio de Faria

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de abril de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor ou do orientador.

Henrique Freire de Andrade Maselli Penna

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações pelo Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora CES/JF em 2010.

Ficha Catalográfica

Penna, Henrique Freire de Andrade Maselli

Estudo da difusão do hidrogênio em fibras ópticas / Henrique Freire de Andrade Maselli Penna ; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga ; co-orientadora: Sully Milena Mejía Quintero. – 2013.

98 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.

Inclui bibliografia

CDD:621

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais Denise e Arthur pelo esforço e amor que me designaram durante toda minha vida, meu irmão Leonardo e minha namorada Thassya pelo amor e apoio.

Ao professor Arthur Braga por toda a orientação, respeito e confiança ao acreditar no meu trabalho e me incentivar durante todo este tempo.

A minha co-orientadora Sully M. M. Quintero por toda sua orientação, paciência, dedicação, ensinamentos e por compartilhar comigo suas maravilhosas ideias e conhecimentos.

Ao Pessoal do Laboratório de Sensores a Fibra óptica (LSFO) pelo tempo concedido para me ajudar, ensinar e me apoiar para atingir meus objetivos, em especial ao Robert, Paula, Victor Hugo e Guilherme pela amizade, apoio e toda ajuda ao longo deste tempo.

Aos meus avós Albertina e Milton por me acolherem, aos meus amigos pela amizade e todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho, oferecendo tanto seu apoio acadêmico como pessoal.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica que contribuíram no meu crescimento acadêmico.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO) pelo apoio financeiro.

Em especial aos meus avós Maria das Victórias e Mario Eugenio que mesmo não mais presentes se fazem presentes em meu coração durante todos os momentos me motivando e dando força para seguir em frente.

Resumo

Henrique Freire de Andrade Maselli Penna; Arthur Martins Barbosa Braga. **Estudo da difusão do hidrogênio em fibras ópticas**. Rio de Janeiro, 2013. 98p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A Indústria do Petróleo e Gás vem implementando sensores a fibra óptica com o intuito de otimizar sua produção através do monitoramento do campo petrolífero em diversas aplicações. Entretanto, há um desafio na implementação de sensores à fibra óptica em locais com presença de compostos como o ácido sulfídrico (H_2S). Tal substância, em contato com a umidade, pode gerar reações químicas que resultem na formação de hidrogênio (H_2), que ao difundir-se nas fibras ópticas, pode comprometer a capacidade de transmissão do sinal óptico devido à interação deste composto com a estrutura atômica da sílica. O presente trabalho estudou os efeitos de difusão de hidrogênio em quatro diferentes tipos de fibras ópticas, a fim de entender as atenuações induzidas por este processo. Este estudo foi realizado utilizando dois métodos experimentais: a avaliação do desempenho dos sensores de temperatura distribuída (DTS) e a análise dos perfis de atenuação do sinal óptico no infravermelho quando as fibras ópticas foram submetidas a diferentes condições de temperatura e pressão de hidrogênio. Dentre as fibras ópticas estudadas, destaca-se a fibra óptica monomodo especial em tubo de metal (FIMT), que não apresentou atenuações significativas e alterações em sua composição estrutural ao ser exposta a presença de diferentes pressões de hidrogênio e diversas temperaturas.

Palavras-chave

Fibras ópticas; hidrogênio; difusão; temperatura; pressão; intensidade.

Abstract

Penna, Henrique Freire de Andrade Maselli; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor). **Study of diffusion of hydrogen in optical fibers**. Rio de Janeiro, 2013. 98p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Oil and Gas Industry is implementing fiber optic sensors, in order to optimize their production by monitoring oilfield in various applications. However, there is a challenge in the implementation of fiber optic sensors in places with presence of compounds such as hydrogen sulphide (H_2S). Such a substance in contact with moisture can cause chemical reactions that result in the formation of hydrogen (H_2), which spread in to optical fibers, may affect the transmission capacity of the optical signal due to interaction of this compound with the atomic structure of silica. In order to understand such effects, this dissertation studied the impacts of hydrogen diffusion in four fiber optics. This study was conducted using two experimental methods: An evaluation of performance of distributed temperature sensors (DTS) and analysis of the profiles of attenuation of the optical signal in the infrared when the optical fibers were subjected to different conditions of temperature and hydrogen pressure. Among the studied optical fibers, the single mode special optical fiber in metal tube (FIMT) stands out because it's showed no significant attenuation and changes in its structural composition when exposed to different hydrogen pressures and various temperatures.

Keywords

Optical fibers; hydrogen; diffusion; temperature; pressure; intensity.

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivo.....	15
1.2	Justificativa	15
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	Conceitos Básicos	18
2.1	Fibras ópticas e suas características	18
2.2	Classificação das fibras ópticas	19
2.2.1	Fibras ópticas tradicionais do tipo monomodo	19
2.2.2	Fibras ópticas tradicionais do tipo multimodo	20
2.2.3	Fibras ópticas especiais “Fiber in the metal tube (FIMT)”	21
2.2.4	Fibra óptica monomodo especial com núcleo revestido com carbono.....	23
2.3	Funcionamento das fibras ópticas	25
2.3.1	Características de transmissão das fibras ópticas	25
2.4	Vantagens e desvantagens das fibras ópticas.....	27
2.5	Sensores a fibra óptica	28
2.6	Espalhamento Raman	29
2.7	Princípio de operação do DTS	31
2.8	Aplicações das fibras ópticas com sistema DTS.....	34
2.8.1	Drenagem gravitacional assistida por vapor (SAGD).....	35
2.8.2	Poços horizontais.....	35
2.8.3	Elevação artificial	36
2.8.4	Assegurar o escoamento	37
3	Relações do hidrogênio com as fibras ópticas.....	39
3.1	Efeitos do hidrogênio em baixa temperatura (H ₂ intersticial)	40
3.2	Efeitos do hidrogênio em alta temperatura (H ₂ reativo)	40
3.3	Efeitos do hidrogênio nos defeitos causados pelos dopantes na estrutura do vidro	41

3.4	Métodos de prevenção dos impactos do hidrogênio em fibras ópticas	42
4	Metodologia	43
4.1	Fibras ópticas avaliadas	43
4.2	Equipamentos e Ferramentas utilizados	43
4.2.1	Equipamentos ópticos.....	44
4.2.1.1	Sensor distribuído de temperatura (DTS)	44
4.2.1.2	Analisador óptico de espectro (OSA).....	44
4.2.1.3	Fonte de luz branca	45
4.2.2	Equipamentos Mecânicos	46
4.2.2.1	Câmara termo-hiperbárica	46
4.2.2.2	Espiral hermética	47
4.2.2.3	Estufa reguladora de temperatura	49
4.2.2.4	Máquina universal de ensaios	49
4.3	Ferramentas.....	50
4.4	Montagens Experimentais	51
4.4.1	Montagem para avaliação do desempenho do equipamento DTS (1ª montagem)	51
4.4.2	Montagem para avaliação da difusão do H ₂ nas fibras ópticas, utilizando a câmara termo-hiperbárica (2ª montagem)	52
4.4.3	Montagem experimental utilizando o OSA e a espiral hermética (3ª montagem).....	52
4.5	Experimentos propostos	53
4.5.1	Avaliação do perfil de atenuação em função da temperatura e pressão	54
4.5.2	Avaliação das propriedades mecânicas.....	57
5	Resultados e Discussões.....	59
5.1	Avaliação do desempenho do equipamento DTS em função da difusão de hidrogênio em fibras ópticas.....	59
5.1.1	Avaliação do Experimento – 1 (pressão constante de 100psi de hidrogênio e temperatura variada)	59
5.1.2	Avaliação do Experimento – 2 (temperatura constante de 50°C e pressão de hidrogênio variada).....	63

5.2	Caracterização do espectro de atenuação das fibras ópticas em função da difusão de hidrogênio sob diferentes condições de temperatura e pressão	65
5.2.1	Variações da temperatura com pressão constante de 100psi de hidrogênio	65
5.2.1.1	Fibra óptica multimodo do tipo padrão	66
5.2.1.2	Fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura	68
5.2.1.3	Fibra óptica monomodo especial em tubo de metal (FIMT)	75
5.2.1.4	Fibra óptica monomodo especial com revestimento de carbono	76
5.2.2	Variações na pressão de hidrogênio com temperatura constante de 50°C	77
5.2.2.1	Fibra óptica multimodo do tipo padrão	78
5.2.2.2	Fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura	78
5.2.2.3	Fibra óptica monomodo especial em tubo de metal (FIMT)	80
5.2.2.4	Fibra óptica monomodo especial com revestimento de carbono	81
5.3	Avaliação das propriedades mecânicas das fibras ópticas	82
5.3.1	Teste de tração mecânica.....	83
6	Conclusões	85
	Referências Bibliográficas	87

Lista de figuras

Figura 1 – Esquema ilustrativo dos componentes de uma fibra óptica.....	18
Figura 2 – Esquema ilustrativo da fibra óptica monomodo.....	20
Figura 3 – Esquema ilustrativo da fibra óptica multimodo de índice degrau.....	20
Figura 4 – Esquema ilustrativo da fibra óptica multimodo de índice gradual.....	21
Figura 5 – Figura ilustrativa/foto da FIMT (Fiber in the metal tube).....	23
Figura 6 – Esquema de uma fibra óptica monomodo com revestimento de carbono.....	24
Figura 7 – Representação esquemática do espalhamento Raman a partir da transição do nível de energia de suas componentes.....	30
Figura 8 – Esquema ilustrativo da aplicação do SAGD (drenagem gravitacional assistida por vapor) sendo monitorado por um equipamento DTS. [58]	35
Figura 9 – Esquema ilustrativo de poços horizontais sendo monitorados por um equipamento DTS.....	36
Figura 10 – Esquema ilustrativo de elevação artificial sendo monitorado por um equipamento DTS [25].....	37
Figura 11 – Esquema ilustrativo de um duto sendo monitorado por um equipamento DTS, com intuito de assegurar o escoamento do fluido [47].....	38
Figura 12 – Foto ilustrativa do equipamento DTS – Sentinel – MEU [22].	44
Figura 13 – Foto ilustrativa do analisador óptico de espectro OSA – Anritsu [4].	45
Figura 14 – Foto ilustrativa da fonte de luz branca – Yokogawa [85]...	46
Figura 15 – Foto ilustrativa da câmara termo-hiperbárica aberta/ fechada.	47
Figura 16 – Foto ilustrativa da montagem da espiral hermética: A) Foto ilustrativa da introdução da FIMT no tubo metálico de aço inox com diâmetro de 3/8”; B) Foto ilustrativa do espaçamento existente entre o tubo da FIMT e o tubo da espiral.	48
Figura 17 – Foto ilustrativa da espiral hermética dentro/fora da estufa.	48

Figura 18 – Foto ilustrativa da estufa reguladora de temperatura – Nova Ética [17].	49
Figura 19 – Foto ilustrativa da máquina universal de ensaios – Instron.	50
Figura 20 – Esquema ilustrativo da 1ª montagem experimental.	51
Figura 21 – Esquema ilustrativo da 2ª montagem experimental	52
Figura 22 – Esquema ilustrativo da 3ª montagem experimental.	53
Figura 23 – Montagem experimental dos testes de tração mecânica: A) Fixação da fibra óptica (colagem); B) Marcação da fibra óptica.	58
Figura 24 – Perfil de temperatura do Teste 1 – A. (pressão constante de 100psi e temperatura constante de 30°C).	60
Figura 25 – Perfil de temperatura do Experimento – 1, com pressão constante de 100psi e temperatura variando de 30°C a 130°C (Somente o processo de hidrogenação foi pressurizado).	61
Figura 26 – Gráfico da média das temperaturas (°C) das seções A e C (pressão constante de 100psi e temperatura variando de 30°C a 130°C, com intervalos de 20°C).	62
Figura 27 – Gráfico da variação das intensidades das componentes (anti-Stokes e Stokes) e da razão das mesmas em função da temperatura de cada teste.	63
Figura 28 – Perfil de temperatura dos testes de 60psi a 350psi no processo de hidrogenação (temperatura constante de 50°C).	64
Figura 29 – Perfil de temperatura dos testes de 60psi a 350psi no processo de hidrogenação referente à seção B (temperatura constante de 50°C).	65
Figura 30 – Espectro de atenuação da fibra óptica multimodo do tipo padrão em função do comprimento de onda (30°C com 100psi de hidrogênio).	66
Figura 31 – Espectro de atenuação da fibra óptica multimodo do tipo padrão obtido através do OSA (130°C com 100psi de hidrogênio).	67
Figura 32 – Espectro de atenuação da fibra óptica monomodo com núcleo de sílica pura em função do comprimento de onda. (30°C com 100psi de hidrogênio)	69
Figura 33 – Espectro de atenuação da fibra óptica monomodo com núcleo de sílica pura em função do comprimento de onda (130°C com 100psi de hidrogênio).	70
Figura 34 – Espectro de atenuação da fibra óptica monomodo com núcleo de sílica pura em função do comprimento de onda	

(temperatura variando entre 30°C e 130°C com 100psi), Somente o processo de hidrogenação foi pressurizado.	71
Figura 35 – Gráfico da intensidade em 1247 nm em função do tempo no Teste 1 – A. Figura 35.A refere-se ao processo de hidrogenação e o Figura 35.B é referente ao processo de desidrogenação.....	72
Figura 36 – Gráfico do tempo de estabilização em função da temperatura. A Figura 36.A refere-se ao processo de hidrogenação e a Figura 36.B é referente ao processo de desidrogenação.....	72
Figura 37 – Gráfico das intensidades em 1247 nm em função da temperatura (temperatura variando de 30°C a 130 C° com 100psi). ...	73
Figura 38 – Espectro da atenuação da fibra FIMT em função do comprimento de onda (100psi com temperatura variando de 100°C a 300 C°).	75
Figura 39 – Espectro da atenuação fibra óptica monomodo especial com revestimento de carbono em função do comprimento de onda (100psi com temperatura variando de 100°C a 300 C°).....	76
Figura 40 – Gráfico da intensidade (nW) em função do tempo (horas) do comprimento de onda de 1390nm.....	77
Figura 41 – Espectro da atenuação da fibra J-FIBER em função do comprimento de onda (50°C com pressão variando de 100psi a 200psi), o sistema foi pressurizado apenas no processo de hidrogenação.....	78
Figura 42 – Espectro da atenuação da fibra com núcleo de sílica pura em função do comprimento de onda (50°C com pressão variando de 60psi a 350psi).	79
Figura 43 – Gráfico das intensidades em 1247 nm em função da temperatura (50°C com pressão variando de 60psi a 350psi).	80
Figura 44 – Espectro de transmissão da FIMT em função do comprimento de onda (50°C com pressão variando 100 a 300psi).....	81
Figura 45 – Espectro de transmissão fibra óptica monomodo especial com revestimento de carbono em função do comprimento de onda (50°C com pressão variando 100 a 300psi).	82
Figura 46 – Figura ilustrativa das fibras ópticas antes e após a bateria de testes.....	83

Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações do sensor distribuído de temperatura DTS – Sentinel – MEU.	44
Tabela 2 – Especificações do analisador óptico de espectro OSA – MS9710B.....	45
Tabela 3 – Especificações da fonte de luz branca Yokogawa.....	46
Tabela 4 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 1.	54
Tabela 5 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 2.	55
Tabela 6 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 3.	55
Tabela 7 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 4.	56
Tabela 8 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 5.	56
Tabela 9 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 6.	56
Tabela 10 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 7.	57
Tabela 11– Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 8.	57
Tabela 12– Resultados dos testes de tração de cada corpo de prova.	84

1 Introdução

A utilização de sensores a fibra óptica está em ascensão na indústria petrolífera, devido ao aumento da demanda por equipamentos de alta confiabilidade e de baixo custo de operação. Estes sensores foram escolhidos devido as suas características, tais como: tamanho compacto, baixo peso, facilidade de multiplexação, monitoramento em tempo real, boa capacidade de transmissão de dados e imunidade a diversos tipos de falhas. Tais características fazem destes sensores uma promissora alternativa [1].

Dentre os sensores a fibra óptica, destaca-se o sensor distribuído de temperatura (DTS), cujo princípio de operação baseia-se no espalhamento Raman e utiliza a própria fibra como elemento sensor. A implementação destes sensores, pode facilitar diversos processos de operação na indústria, como a monitoração de poços, reservatórios, dutos e outros [2].

A Halliburton cita diversos métodos que foram otimizados, devido às vantagens proporcionadas por este equipamento, como acompanhar o processo de tratamento de ácidos em tempo real, fornecer informações sobre os locais onde os fluidos de estimulação atuam no reservatório, e ou determinar zonas frias ou quentes do poço/reservatório [3;4].

O equipamento DTS, assim como outros sensores está suscetível a falhas, que podem surgir através fatores, como a instrumentação da fibra óptica, natureza da instalação, idade da instalação, comprimento de onda do laser usado, e fatores externos. Essas falhas aparecem como discrepâncias, erros de temperatura, baixa resolução, e semelhantes [5].

Um exemplo desses fatores externos na indústria petrolífera são as substâncias químicas, como o ácido sulfídrico (H_2S), que está presente como impureza natural, em fluidos como o petróleo e o gás natural [6]. Quando esta substância entra em contato com a água e ou metais, estabelece-se uma interação entre suas moléculas, formando uma reação química, que pode gerar o hidrogênio (H_2), elemento capaz de fragilizar os metais que constituem os equipamentos e alterar parâmetros de medição de sensores a fibra óptica.

Quando o DTS opera em ambientes hidrogenados, o elemento sensor (fibra óptica) se torna vulnerável aos efeitos causados pela difusão do hidrogênio. Este efeito ocasiona atenuações não homogêneas da luz para diferentes comprimentos de onda, resultando em medições errôneas da temperatura [7].

O processo de difusão do hidrogênio pode provocar atenuações permanentes ou reversíveis, em função da temperatura e pressão de hidrogênio [6]. Além de fragilizar a estrutura molecular das fibras ópticas, através da formação de hidroxilas (OH), resultante da reação química entre as moléculas de hidrogênio e os elementos dopantes.

A comunidade científica vem se especializando no desenvolvimento de novas fibras ópticas especiais, que sejam imunes aos diferentes agentes externos ou internos, causadores do aumento na atenuação do sinal óptico.

Esta dissertação de mestrado foi realizada dentro do escopo da segunda etapa do projeto "Avaliação de tecnologias de sensoriamento distribuído de temperatura e pressão utilizando fibras ópticas". Este projeto é desenvolvido em colaboração com a Petrobras.

1.1 Objetivo

Esta dissertação de mestrado possui três objetivos principais:

- Avaliar como o desempenho do sensor distribuído de temperatura (DTS) é afetado em função da difusão de hidrogênio na fibra óptica.
- Avaliar quatro tipos de fibra óptica, através da monitoração da atenuação do sinal óptico, quando submetidas a diferentes condições de temperatura e pressão de hidrogênio.
- Avaliar as propriedades mecânicas das fibras ópticas antes e após serem expostas ao hidrogênio.

1.2 Justificativa

Grandes empresas atuantes no campo petrolífero, tais como: Shell, Halliburton e a Petrobras vem implementado sensores distribuídos de temperatura (DTS) visando melhorar vários de seus processos. A Petrobrás publicou em seu site um relatório tecnológico, anunciando a instalação deste equipamento em seis poços no campo de Fazenda Alegre (ES) no ano de 2011

[8]. Embora este sensor esteja estabelecido no mercado e inúmeros exemplos demonstrem a sua viabilidade, existem algumas questões em aberto que ainda precisam ser investigadas. Exemplo disso são as atenuações induzidas pela difusão de hidrogênio que resultam no comprometimento do desempenho do sensor.

1.3

Estrutura do trabalho

- O capítulo 1 aborda as considerações gerais sobre o presente trabalho, apresentando a estrutura e o processo de desenvolvimento do mesmo.
- O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica buscando embasamento em trabalhos de pesquisadores que contribuam para o desenvolvimento/conhecimento técnico de conceitos associados ao tema de interesse. Além de enfatizar as informações necessárias para o desenvolvimento desta dissertação.
- O capítulo 3 descreve os efeitos gerados pelo hidrogênio nas fibras ópticas, apresentando os distintos mecanismos capazes de promover perdas induzidas pelo mesmo. Enfatizando a influência dos dopantes, baixas temperaturas e altas temperaturas nos impactos promovidos pelo hidrogênio. Apresentando também, métodos para prevenir tais efeitos.
- O capítulo 4 detalha os tipos de fibras ópticas utilizadas, equipamentos ópticos/mecânicos e ferramentas utilizadas para realização dos procedimentos experimentais adotados. Descreve as três montagens utilizadas de forma individual, apresentando as figuras ilustrativas das mesmas. Lista os experimentos propostos especificando os objetivos, os dados a serem utilizados em sequência cronológica e individual. Apresenta também, a metodologia utilizada para a realização da avaliação mecânica das fibras ópticas.

- O capítulo 5 aborda os resultados obtidos através dos testes propostos para compreender os efeitos da difusão do hidrogênio em fibras ópticas. Nesta abordagem apresenta-se uma discussão dos fatos ocorridos no decorrer dos testes experimentais, descritos no Capítulo 4. Os resultados dos experimentos propostos foram abordados da seguinte forma: inicialmente, de forma individual, verificam-se os resultados obtidos pela determinação do coeficiente de absorção das fibras ópticas utilizadas. Posteriormente, avalia-se a influência da temperatura e da pressão absoluta de hidrogênio aos efeitos gerados pela difusão de hidrogênio. Além de avaliar a o desempenho do equipamento DTS em realizar medições em ambientes hidrogenados, em função dos testes propostos. Por último, porém não menos importante, apresenta-se uma análise das propriedades mecânicas das fibras ópticas utilizadas.
- O capítulo 6 apresenta uma conclusão dos resultados obtidos, realizando uma discussão simplificada e sugestões para trabalhos futuros.

2 Conceitos Básicos

2.1 Fibras ópticas e suas características

As fibras ópticas são componentes de transmissão óptica dielétrica, que podem transmitir informações através de um sinal luminoso. Estas fibras são filamentos finíssimos e flexíveis de vidro de alta pureza (sílica - SiO_2), ou de outro material transparente com alto índice de refração. Sua estrutura cilíndrica possui dimensões microscópicas que podem ser comparadas a um fio de cabelo humano.

Geralmente, as fibras ópticas são formadas por três cilindros: revestimento primário, casca e núcleo. O cilindro intermediário, denominado casca, é constituído por um material com índice de refração (n_2) inferior ao índice de refração (n_1) do cilindro interior, descrito como núcleo da fibra óptica. A diferença existente entre os índices de refração possibilita a propagação do sinal luminoso através do núcleo da fibra óptica. Quando um sinal luminoso se propaga no núcleo da fibra óptica e atinge a casca, a luz é refletida para o centro do núcleo, ficando assim aprisionada pelo princípio da reflexão total [9;10;11]. A camada exterior da fibra óptica é conhecida como revestimento primário, cobertura plástica, ou capa protetora. Este revestimento pode ser feito com acrilato ou poliamida, onde o intuito é proteger as demais camadas de danos mecânicos e intempéries. Outros tipos de coberturas, como por exemplo, materiais metálicos, cerâmicos e plásticos, também favorecem no aumento da proteção.

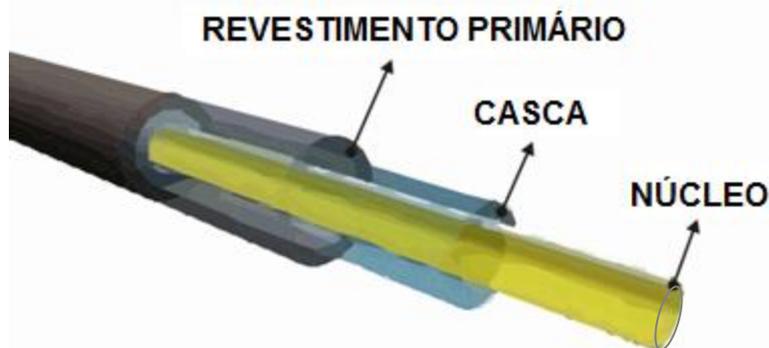


Figura 1 – Esquema ilustrativo dos componentes de uma fibra óptica.

O índice de refração do núcleo de uma fibra óptica pode ser alterado de acordo com o dopante aplicado. Os dopantes comumente utilizados são o germânio (Ge), fósforo (P) e o boro (B). Pode-se utilizar o índice de refração também para classificar uma fibra óptica quanto ao índice degrau ou gradual. Os modos de propagação são soluções espaço-temporais das equações de Maxwell para cada fibra, caracterizando configurações de campos elétricos e magnéticos que se repetem ao longo de toda extensão da fibra óptica. Na prática, representam as diferentes possibilidades de propagação da luz pela fibra.

O núcleo de uma fibra óptica normalmente varia entre 8 μm e 62,5 μm . O comportamento da fibra óptica varia com o diâmetro de seu núcleo e a dimensão do mesmo irá depender da aplicação requerida. Já o diâmetro da casca geralmente possui um valor de 125 μm , independente do diâmetro do núcleo. No entanto, não há um valor estipulado e este varia de acordo com o interesse de cada fabricante. A cobertura externa da fibra óptica possui um diâmetro padronizado da ordem de 245 μm a 250 μm [10].

Para a montagem de sistemas ópticos, faz-se necessário o uso de equipamentos e ferramentas especiais, como clivadores (seccionam a fibra de forma perpendicular e adequada), máquina de emenda de fibras ópticas (une duas extremidades de fibra óptica através de fusão), alicates (removem o revestimento primário) e etc [11].

2.2 **Classificação das fibras ópticas**

Nesta seção apresenta-se uma breve descrição de alguns tipos de fibras ópticas, dentre essas, estão as utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

2.3 **Fibras ópticas tradicionais do tipo monomodo**

São definidas como fibras ópticas que permitem apenas um único modo de propagação, ou seja, os raios de luz percorrem o interior da fibra por apenas um caminho, como ilustrado pela Figura 2.

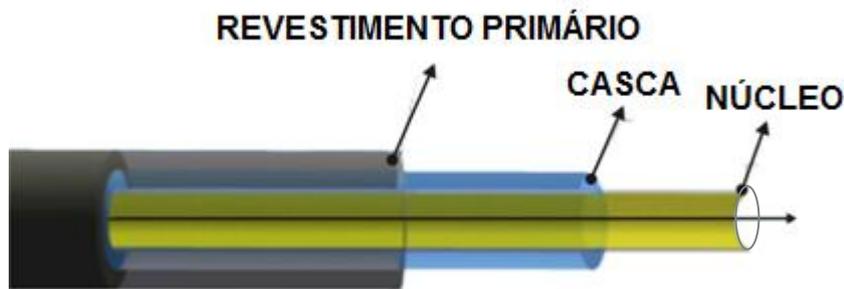


Figura 2 – Esquema ilustrativo da fibra óptica monomodo.

As fibras ópticas do tipo monomodo, geralmente apresentam um núcleo de $9\ \mu\text{m}$ e atenuação no sinal óptico de aproximadamente $0,3\ \text{dB/Km}$ para um comprimento de onda de $1310\ \text{nm}$, dependendo do fabricante. Esta baixa atenuação proporciona um aumento na capacidade de transmissão, sem o uso de repetidores (equipamentos que ampliam a capacidade de transmissão do sinal óptico) [12].

2.3.1 Fibras ópticas tradicionais do tipo multimodo

As fibras ópticas multimodo, geralmente apresentam um núcleo de $50\ \mu\text{m}$ e podem ser caracterizadas como fibras ópticas que possuem vários modos de propagação, pois as mesmas fazem com que os raios da luz incidente percorram diversos caminhos de propagação no interior da fibra. Dependendo do modo de propagação, estas fibras classificam-se em: fibras multimodo de índice degrau ou fibras multimodo de índice gradual, como representado pelas Figuras 3 e 4 respectivamente:

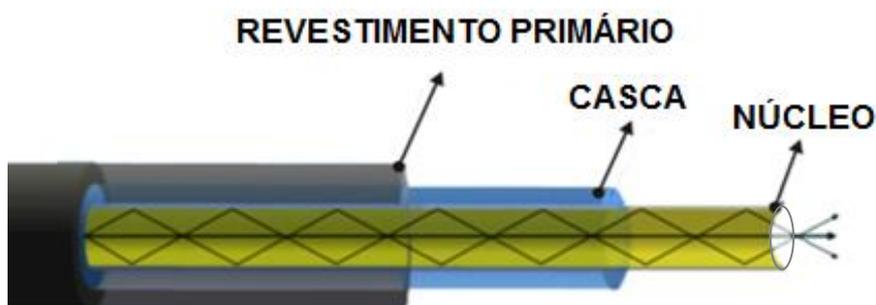


Figura 3 – Esquema ilustrativo da fibra óptica multimodo de índice degrau.

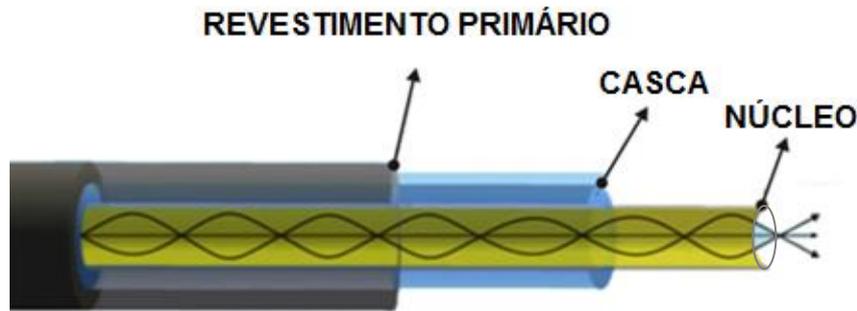


Figura 4 – Esquema ilustrativo da fibra óptica multimodo de índice gradual.

As fibras ópticas multimodo de índice degrau possuem um núcleo composto por um material homogêneo, com um índice de refração constante e geralmente, maior do que o índice de refração da casca, fazendo com que o pulso luminoso seja refletido através do núcleo da fibra por uma trajetória retilínea. Esse tipo de fibra possui uma banda passante muito estreita, que restringe sua capacidade de transmissão. Já nas fibras multimodo de índice gradual, o sinal luminoso se propaga através de uma trajetória curvilínea em função da variação do índice de refração de seu núcleo. Este tipo de fibra evita o efeito do alargamento do pulso luminoso, porém demanda de um processo de fabricação complexo, pois o índice de refração gradual só é possível devido às doses de diferentes dopantes que são aplicadas ao núcleo da fibra óptica, o que faz com que o índice de refração diminua gradualmente do centro do núcleo para a casca [12;10]. Estas fibras apresentam uma atenuação média de 0,8 dB/Km para um comprimento de onda de 1310 nm, podendo variar de acordo com cada fabricante.

2.3.2

Fibras ópticas especiais “Fiber in the metal tube (FIMT)”

Nesta seção, descreve-se uma classe especial de fibra óptica que tem atraído à atenção da comunidade científica. Trata-se das fibras ópticas revestidas por um tubo de metal (Fiber in the metal tube - FIMT). Pode-se caracterizar uma FIMT como uma fibra óptica monomodo ou multimodo, encapsulada por um tubo metálico robusto e hermeticamente seguro. Este encapsulamento aumenta significativamente a estabilidade mecânica da fibra, o que fornece uma maior proteção contra as pressões hidrostáticas, aos ambientes corrosivos e contra os efeitos das altas temperaturas, se comparadas às fibras ópticas convencionais.

Esta estrutura metálica pode ser constituída por mais de uma camada, além de poder mesclar suas camadas com vários tipos de metais, ou ligas metálicas especiais. Os componentes metálicos mais comumente utilizados são: o aço inoxidável 304, o aço inoxidável 316, o alumínio, o incoloy 825 e o inconel 625. Estas estruturas podem possuir uma ou várias fibras ópticas contidas dentro desta estrutura metálica concêntrica. O diâmetro externo (OD) do tubo metálico define a espessura da parede. Existem variados tamanhos, como por exemplo, tubos possuindo um OD de 0,84 mm e contendo apenas uma única fibra óptica, ou tubos com um OD de 3,65 mm com capacidade para conter até 72 fibras ópticas encapsuladas. Estas fibras ópticas são comercializadas como insensíveis ao hidrogênio e podem operar em temperaturas de até 450°C, sendo assim, uma alternativa para ambientes que contenham a presença de hidrogênio ou compostos que possam a vir gerá-los [13;14].

Uma das importantes características desta fibra é a sua capacidade de suportar alterações rápidas e drásticas de temperatura e pressão. Tais alterações podem causar pequenas variações no comprimento da fibra, portanto, deve-se assegurar um comprimento excessivo da fibra (EFL), que garanta um desempenho contínuo em qualquer condição operacional. O EFL é definido pela porcentagem de fibra em excesso introduzida no tubo metálico, com objetivo de evitar possíveis danos à fibra causados pela dilatação/contração do tubo metálico, que por sua vez, está relacionado com o coeficiente de expansão térmico de cada material utilizado na fabricação do tubo. Independente da aplicação, os tubos metálicos que revestem estas fibras devem sempre ser submetidos a testes de vazamentos para verificar as costuras das soldas.

Especificamente no presente trabalho a fibra contida no tubo era uma fibra de núcleo de sílica pura. O presente trabalho utilizou uma fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura encapsulada em um tubo de metal com diâmetro de 1/4", constituído por três diferentes tubos (FIMT). Este conjunto forma um único tubo metálico hermeticamente seguro. Estes três tubos possuem propriedades desconhecidas, no entanto, são produzidos de modo a complementarem-se uns aos outros, preenchendo os espaços, sem deixar folgas entre suas camadas. Nesta montagem, existem duas camadas de aço inoxidável: a externa, com um diâmetro de 1/4" e a interna, com 3/32". Além disso, existe uma camada intermediária de alumínio com 3/16" de diâmetro, conforme apresentado na Figura 5:

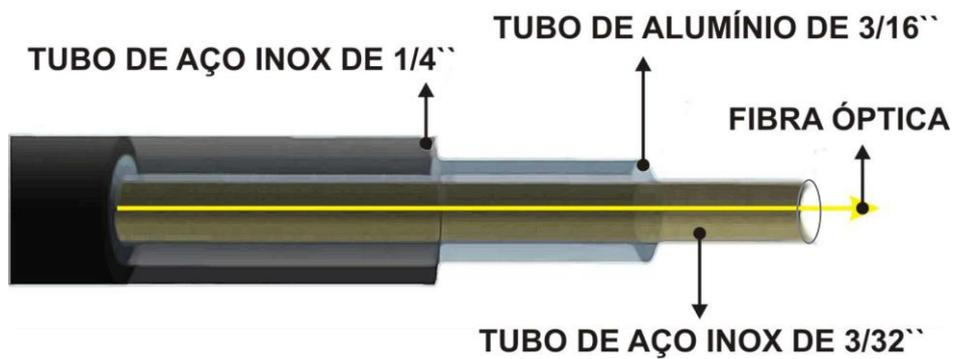


Figura 5 – Figura ilustrativa/foto da FIMT (Fiber in the metal tube).

2.3.3

Fibra óptica monomodo especial com núcleo revestido com carbono

As fibras ópticas, que possuem revestimento de carbono foram desenvolvidas com intuito de serem impermeáveis à entrada de hidrogênio e a algumas formas de ataque químico. Entretanto, as mesmas ainda não são completamente imunes aos efeitos do hidrogênio, e também sofrem atenuações por microcurvatura. Estas fibras ópticas estão disponíveis no mercado nas versões monomodo e multimodo [12].

Os revestimentos de carbono podem ser formados pela seguinte forma: ao iniciar o processo de puxamento da fibra, um gás inerte é utilizado como manta isolante, para manter a zona de reação, introduz-se gases reagentes tais como metano (CH_4) e silano (SiH_4). Uma vez que estes gases entram em contato com a superfície nua e quente (500 a 1000°C) da fibra, uma camada de carbono começa a ser formada. Estes revestimentos não introduzem perdas adicionais à fibra óptica e funcionam como barreiras herméticas. As atenuações destas fibras podem variar com o tipo de fibra, ou seja, se a mesma é monomodo ou multimodo. As fibras monomodo possuem uma atenuação média de $0,4$ dB/km e as multimodo de $0,7$ dB/Km [15].

A Figura 6 ilustra uma representação esquemática de uma fibra óptica monomodo com revestimento de carbono.

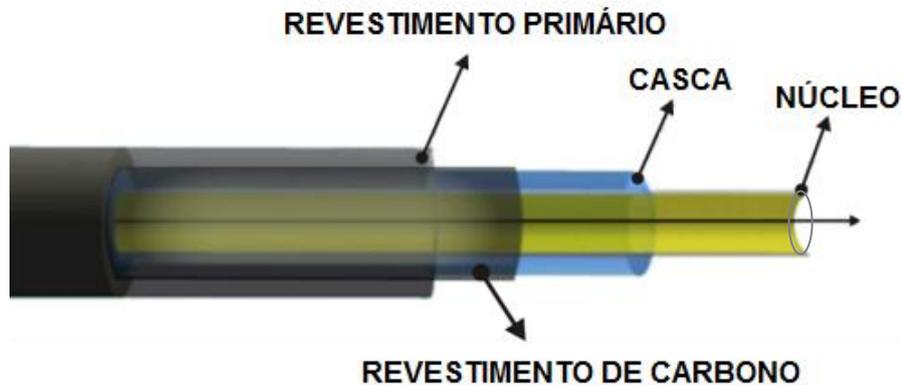


Figura 6 – Esquema de uma fibra óptica monomodo com revestimento de carbono.

Mendez afirma que o comportamento deste tipo de fibra óptica, não sofre nenhum tipo de degradação quando expostas a temperaturas elevadas até 300°C. Acima desta temperatura, o revestimento de carbono pode se oxidar ao entrar em contato com o oxigênio. Além de relatar, que a partir de ensaios experimentais, constatou que ao expor tal fibra a altas temperaturas, como as de um poço de petróleo, a mesma apresentou perda em sua transmissão óptica. Fato crítico para determinadas aplicações.

O revestimento de carbono oferece uma boa proteção química. No entanto, tal revestimento dificulta a clivagem, emenda e, em geral encarece o preço das fibras ópticas. Várias empresas vêm comercializando as fibras ópticas com revestimento de carbono, algumas destas empresas são:

- Corning [15];
- Acreo (Fibertronix) [16].

Nesta dissertação de mestrado, investigou-se a fibra óptica monomodo com revestimento de carbono. Esta fibra óptica foi cedida pela empresa Acreo e possui as seguintes características: núcleo dopado com germânio, casca de sílica com diâmetro de 125 μm , o revestimento de carbono e o revestimento primário constituído por acrilato totalizando um diâmetro de 237 μm .

2.4 Funcionamento das fibras ópticas

A transmissão do sinal óptico segue o seguinte princípio: a luz percorre o núcleo da fibra óptica por reflexões sucessivas. O sinal luminoso trafega através do núcleo até atingir a interface superior núcleo/casca, onde é refletido para o centro do núcleo até atingir a interface inferior núcleo/casca, sendo novamente refletido em direção ao centro do núcleo, e assim sucessivamente. Esse fenômeno é possível devido à capacidade de reflexão interna total das ondas, alcançada segundo a Lei de Snell, demonstrada abaixo [9;10]:

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2 \quad (1)$$

Onde:

- n_1 = Índice de refração do núcleo;
- n_2 = Índice de refração da casca;
- $\operatorname{sen}\theta_1$ = Ângulo entre o raio incidente;
- $\operatorname{sen}\theta_2$ = Ângulo de refração.

O núcleo tem a função de propagar o sinal óptico ao longo da fibra, enquanto a casca tem o objetivo de manter esse sinal viajando no interior do núcleo, por sucessivas reflexões. Para que isto ocorra, é necessário que o ângulo limite de incidência da luz seja maior ou igual ao ângulo crítico. Uma vez satisfeita essa condição, o sinal luminoso se propaga no núcleo, cujo índice de refração é n_1 , atingindo a superfície de outro meio, com índice de refração n_2 (casca), e retorna ao meio com índice de refração n_1 , conduzindo-se as informações [1;9;10]. Caso esta condição não seja satisfeita, a luz é refratada, ocasionando perdas na transmissão do sinal óptico.

O uso de materiais dopantes permite a alteração do índice de refração de um meio. As fibras ópticas monomodo, mesmo que dopadas, possuem núcleo com índice de refração constante e apenas um modo de propagação da luz.

2.4.1 Características de transmissão das fibras ópticas

O sinal luminoso, ao ser transportado no interior de uma fibra óptica, pode sofrer interferências, causando perdas na intensidade de transmissão do sinal óptico. Este fenômeno é denominado atenuação. Com a finalidade de

facilitar o cálculo da atenuação do sinal, geralmente utiliza-se a seguinte fórmula [9;10]:

$$\text{Atenuação} = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_0} \right) \left(\frac{1}{L} \right) \quad (2)$$

Onde:

- P_i = Potência de entrada;
- P_0 = Potência de saída;
- L = Comprimento da fibra óptica.

É fundamental observar que, a atenuação na transmissão do sinal luminoso varia de acordo com o comprimento de onda que se está analisando e esta atenuação pode ser causada por fatores como:

- Absorção;
- Espalhamento;
- Curvaturas.

A absorção é definida por dois tipos básicos: a absorção intrínseca e a absorção extrínseca. A absorção intrínseca depende fundamentalmente do material utilizado na composição da fibra óptica. Já a absorção extrínseca, que constitui o principal fator de perdas em fibras ópticas, é um processo resultante da contaminação por impurezas. Isso se deve ao método adotado na fabricação das fibras, onde o filamento é exposto aos componentes externos, possivelmente causando a absorção de íons metálicos que provocam picos de absorção em determinados comprimentos de onda. Esta contaminação demanda a utilização de técnicas de purificação dos materiais que compõem a fibra, com o objetivo de reduzir os efeitos causados pelos íons metálicos, mantendo a contaminação em um nível aceitável.

O espalhamento, como supracitado, também é um dos fatores que geram a atenuação. Esse processo consiste no desvio de parte da energia luminosa incidente através de várias direções. O espalhamento divide-se em três tipos básicos, [17]:

- Espalhamento Rayleigh;
- Espalhamento Brillouin;
- Espalhamento Raman.

As perdas por curvaturas em fibras ópticas ocorrem quando o sinal luminoso, ao percorrer a fibra, se depara com curvas macroscópicas, que podem chegar próximo de 90°, ou microscópicas, que são pequenas ondulações entre a casca e o núcleo. Alguns raios de luz podem formar um ângulo crítico e saírem da fibra, causando perda de potência [12].

2.5

Vantagens e desvantagens das fibras ópticas

Atualmente, dentre os meios de comunicação mais eficazes utilizados por empresas que buscam tecnologia de ponta, destaca-se a fibra óptica. Segura, flexível e extremamente versátil na transmissão de dados, este componente proporciona consideráveis vantagens em relação aos demais meios de comunicação encontrados no mercado.

As fibras ópticas possuem características especiais, como pequena dimensão, peso reduzido, velocidade na transmissão de dados, entre outras. Podem ser até 20 vezes mais finas que os cabos elétricos convencionais, sem perder a capacidade de transmissão. Quanto ao peso, as fibras ópticas também se destacam, pois são muito leves. Com a combinação destas características, as fibras ópticas contribuem para aliviar o problema de espaço nos dutos, sendo altamente indicadas para a transmissão de informações em navios, aviões, satélites e etc.

A produção de fibras ópticas requer processos sofisticados para a obtenção de um vidro de alta pureza, o que é relativamente caro. Porém, dependendo da aplicação, a relação custo/benefício pode oferecer condições vantajosas em relação aos demais meios de comunicação devido aos diversos benefícios que a fibra óptica proporciona.

No aspecto de segurança, as fibras ópticas são indicadas para os locais com risco de fogo e de explosões constantes, como as áreas petroquímicas ou ambientes onde existem gases voláteis. Sendo assim, a fibra óptica é a uma ótima opção, pois a mesma elimina o risco de curto-circuito, faíscas, choques elétricos e fornecem boa segurança na transmissão de dados. Com isso, as fibras são utilizadas em aplicações que necessitam um alto grau de segurança, como aplicações bancárias, militares e etc. Outra qualidade importante da fibra óptica é a alta tolerância à temperatura, o que favorece a utilização em diversas aplicações. Além disso, elas contribuem para uma maior confiabilidade e vida útil do sistema.

Devido ao baixíssimo índice de perda na transmissão de dados, as distâncias alcançadas pelos cabos ópticos são consideravelmente grandes. Tal fato tende a aumentar cada vez mais, pois as fibras ópticas e os equipamentos envolvidos na transmissão e na recepção de dados estão em desenvolvimento. Esta capacidade de transmissão está diretamente relacionada ao comprimento de onda da luz.

Dentre as desvantagens do uso da fibra óptica, pode-se citar o difícil manuseio devido à sua fragilidade. Por serem extremamente delicadas, é necessário muito cuidado ao manuseá-las, pois qualquer desatenção pode ocasionar uma ruptura das mesmas. Outro ponto negativo é o alto custo quando comparado aos métodos menos sofisticados, porém, como citado anteriormente, os benefícios podem compensar o investimento.

2.6

Sensores a fibra óptica

Os sensores a fibra óptica possuem inúmeras vantagens técnicas, tais como: imunidade aos campos elétricos e magnéticos; baixo consumo de energia; baixa atenuação do sinal transmitido. São utilizados para diferentes campos, como por exemplo: campo acústico, campo magnético, campo elétrico, temperatura, pressão, posição, ângulo, deformação e etc [18].

Os sensores a fibra óptica podem ser classificados de várias formas: sensores pontuais, onde o elemento sensor é localizado em um local específico da fibra óptica; sensores multipontuais ou sensores semi-distribuídos, que podem apresentar múltiplos pontos de sensoriamento, ou até mesmo, uma geração de sensores mais evoluídos; e ainda os sensores distribuídos, que possuem um elemento sensor contínuo. Além de classificá-los, pode-se agrupá-los em duas principais categorias: intrínsecos, onde o elemento que realiza a função sensorial está localizado na própria fibra óptica e extrínsecos, onde o sensoriamento ocorre por meio de um elemento sensor externo à fibra óptica, de forma que a mesma é utilizada apenas como um guia de onda do sinal luminoso.

No presente trabalho foi realizado um estudo sobre a influência da difusão de hidrogênio no desempenho do sensor distribuído de temperatura (DTS), que é baseado no espalhamento Raman. Este equipamento utiliza a própria fibra óptica como elemento sensor, ou seja, sensor intrínseco.

2.7 Espalhamento Raman

O espalhamento Raman foi proposto pela primeira vez em 1980 para aplicações sensíveis à temperatura. Neste espalhamento, ocorrem interações entre o campo eletromagnético incidente e os momentos de dipolo do meio que, por sua vez, contribuem para o movimento coletivo das moléculas das fibras ópticas, gerando os modos vibracionais e rotacionais destas moléculas. O espalhamento Raman é um espalhamento inelástico, onde ocorre uma transferência de energia entre fótons e fônons ópticos (modos vibracionais e rotacionais das moléculas das fibras ópticas), resultando em duas componentes Stokes e anti-Stokes [2;17].

Na componente Stokes, os átomos das moléculas são excitados desde seu estado fundamental até um estado de energia virtual pela absorção de um fóton e depois se relaxam até um estado vibracional excitado pela emissão de outro fóton de energia. Como o fóton incidente possui um nível de energia maior do que o fóton emitido, um fônons óptico é emitido. Com isso, esta componente se torna independente da temperatura [19;20;21].

Entretanto, na componente anti-Stokes, o estado final de energia do átomo está em um nível de energia menor que o estado inicial dos átomos, que estão inicialmente excitados. Como o fóton emitido possui energia maior do que a energia do fóton incidente, um fônons óptico é absorvido. Os fótons de anti-Stokes só podem ser emitidos através de átomos que estejam excitados e, como o número de átomos excitados é proporcional à temperatura, a intensidade da componente anti-Stokes também se torna proporcional à mesma [20; 21].

A Figura 7 ilustra os níveis de energia envolvidos no espalhamento Raman. A componente Stokes, representada pela seta verde, possui um nível de energia menor que a do sinal de entrada, ilustrado pela seta azul, enquanto que a componente anti-Stokes, representada pela seta roxa, possui um nível de energia maior que a do sinal de entrada representado pela seta azul. Nota-se também que, o nível de energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda.

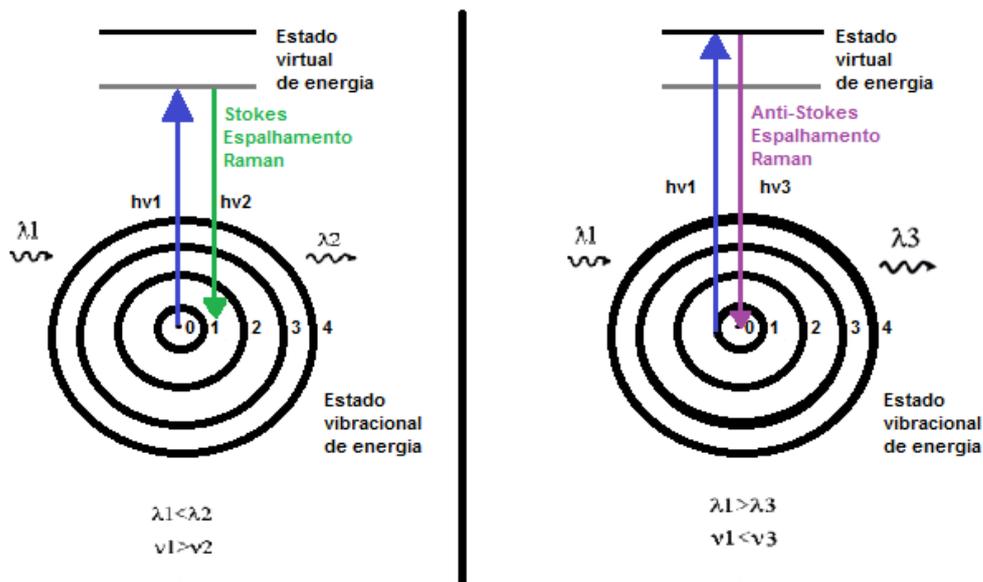


Figura 7 – Representação esquemática do espalhamento Raman a partir da transição do nível de energia de suas componentes.

A intensidade da componente Stokes e da componente anti-Stokes do espalhamento Raman, são definidas por:

$$I_R = I_0 N_0 \frac{\sigma_R}{(\lambda_i \pm \lambda)^4} \quad (3)$$

$$I_{Stokes} = I_0 N_g \frac{\sigma_R}{(\lambda_i + \lambda)^4} \quad (4)$$

$$I_{anti-Stokes} = I_0 N_g \exp\left(\frac{\nu}{KT}\right) \frac{\sigma_R}{(\lambda_i - \lambda)^4} \quad (5)$$

Onde:

- I_0 = Intensidade da luz incidente;
- N_0 = População de elétrons que estão em estado fundamental;
- σ_R = Sessão transversal do espalhamento Raman com a sílica;
- λ_i = Comprimento de onda do feixe incidente;
- λ = Comprimento de onda.

Para calcular a intensidade da componente Stokes (equação 4), utiliza-se N_0 igual à N_g (População de elétrons da componente Stokes que está em estado fundamental). Entretanto, para calcular a intensidade da componente anti-Stokes (equação 5), deve-se utilizar [20]:

$$N_0 = N_g \exp\left(\frac{\nu}{kT}\right) \quad (6)$$

Onde:

- N_0 = População de elétrons da componente anti-Stokes;
- N_g = População de elétrons da componente Stokes que está em estado fundamental;
- ν = Frequência de radiação dos fótons;
- K = Constante de Boltzmann;
- T = Temperatura (Kelvin).

O espalhamento Raman pode ser do tipo espontâneo ou estimulado, entretanto, sistemas do tipo DTS utilizam o espalhamento espontâneo, que é constituído por um pulso luminoso, que percorre a extensão de uma fibra óptica até que ocorra o efeito de retroespalhamento da luz [21].

2.8 Princípio de operação do DTS

Um sistema DTS pode ser definido como sensores distribuídos de temperatura. São constituídos por uma unidade optoeletrônica que contém uma fonte de luz integrada, um receptor, um computador e a fibra óptica (elemento sensor). Este sistema fornece ao seu usuário técnicas de medições distribuídas de temperatura, por meio de fibras ópticas que são de natureza passiva e não possuem pontos individuais de detecção, atuando como sensores lineares.

O princípio de funcionamento do DTS pode ser descrito da seguinte forma: a fonte de luz emite um curto pulso óptico, com duração média de 10 ns, onde o mesmo viaja por toda extensão da fibra óptica. Ao viajar pela fibra, o pulso de luz interage com a vibração molecular presente na fibra óptica, resultando em feixes de luz com frequências ligeiramente deslocadas que viajam de volta para o início da fibra. Este efeito é denominado

retroespalhamento. O pulso de luz "retroespalhado" é, então, analisado pelo receptor óptico para fornecer a temperatura a partir do ponto onde se originou o retroespalhamento. Sendo a velocidade da luz uma constante, o tempo de viagem do pulso de luz, da emissão até o seu retorno, caracteriza a posição da temperatura gravada ao longo da fibra [2].

O monitoramento dos pulsos de luz retroespalhados permite a elaboração de um perfil contínuo de temperatura ao longo de todo elemento sensor. A precisão deste sistema pode ser relacionada às grandes distâncias. Geralmente os sistemas do tipo DTS possuem:

- Resolução espacial de 1 m;
- Resolução térmica de 1°C;
- Capacidade para monitorar distâncias de até 30 km.

Pode-se definir a resolução espacial como a capacidade de sensoriamento de certas distâncias. Esta capacidade depende da largura do pulso, pois quanto maior a largura do pulso, pior a resolução espacial. Resolução térmica pode ser definida como a capacidade de detectar a menor variação de temperatura capaz de provocar uma alteração perceptível no indicador do equipamento.

A razão entre as componentes anti-Stokes e Stokes é praticamente independente do material e dependente apenas da temperatura. Esta relação pode ser descrita por:

$$R_{(T)} = \frac{I_{anti-stokes}}{I_{Stokes}} \quad (7)$$

Para determinar a temperatura a partir da razão entre as intensidades de anti-Stokes e Stokes, o sistema DTS utiliza uma bobina de fibra óptica (localizada em sua unidade optoeletrônica) como referência para realizar sua calibração. Esta bobina é mantida a uma temperatura constante conhecida (θ). Tal calibração fornece uma razão $R_{(T)}$ conhecida, possibilitando mensurar temperaturas desconhecidas (T). O cálculo das diversas temperaturas pode ser feito através de [20]:

$$T = \left[\frac{1}{\theta} - \frac{K}{hcv} \ln \left(\frac{R_{(T)}}{R_{(\theta)}} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

Onde:

- θ = Temperatura constante da bobina de fibra óptica, localizada no interior do equipamento DTS;
- K = Constante de Boltzmann ($K = 1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K);
- h = Constante de Planck ($h = 6,6260693 \times 10^{-34}$ J/s);
- c = Velocidade da luz no vácuo ($c = 3 \times 10^8$ m/s);
- ν = Frequência da radiação de fótons ($\nu = 13 \times 10^{12}$ Hz em 1064 nm);
- $R_{(T)}$ = Razão fornecida pelas intensidades das componentes do espalhamento Raman, fornecidas pela fibra monitorada (elemento sensor);
- $R_{(\theta)}$ = Razão fornecida pelas intensidades das componentes do espalhamento Raman, fornecidas pela fibra de calibração (bobina interna).

O equipamento DTS pode fornecer uma indicação absoluta da distribuição de temperatura ao longo da fibra óptica. No entanto, equipamentos baseados no espalhamento Raman sofrem uma sensibilidade em relação às perdas maiores, por serem mais sensíveis à atenuação das fibras ópticas e às perdas de transmissão devido à separação entre as bandas de anti-Stokes e Stokes. Cada fabricante utiliza um tipo diferente de fonte de luz, podendo ser do tipo laser ou diodo de laser.

O comprimento de onda utilizado pelos equipamentos DTS são 900nm, 1060 nm, 1310 nm e 1550nm [22]. Consequentemente, as componentes anti-Stokes e Stokes podem ser definidas por:

$$|\Delta\lambda| = \left(\frac{\lambda_0^2}{c_0} \right) |\Delta\nu| \quad (9)$$

Onde:

- λ_0 = Comprimento de onda utilizado pelo equipamento;
- c_0 = Velocidade da luz no vácuo;
- $\Delta\nu$ = Variação da frequência de radiação dos fótons.

Em geral, os sistemas são concebidos para utilização de fibra ópticas do tipo multimodo, a fim de tirar vantagem da sua grande abertura numérica (que aumenta a quantidade de luz retroespalhada que pode ser guiada) e para

acomodar com a baixa intensidade da luz no espalhamento Raman espontâneo. No entanto, a alta atenuação de fibras multimodo limita o alcance espacial do sistema a alguns quilômetros. Portanto, alguns sistemas DTS estão disponíveis para utilização de fibras ópticas do tipo monomodo [20].

Estes equipamentos geralmente necessitam de um longo tempo de medição, devido à baixa intensidade do espalhamento Raman, acarretando em uma melhor resolução térmica. Por outro lado, essa resolução piora em distâncias muito longas, uma vez que tanto o sinal de entrada, quanto o retroespalhado são atenuados à medida que se propagam.

O equipamento DTS pode possuir uma aplicação permanente ou pode ser reinstalado para cada uso, além de ser inerentemente seguro para uso em ambientes com altas tensões elétricas.

2.9

Aplicações das fibras ópticas com sistema DTS

Na indústria de petróleo e gás, as fibras ópticas possuem um grande potencial de sensoriamento, com uma ampla gama de aplicações. Uma dessas aplicações é o uso do sensor distribuído de temperatura (DTS), que possui varias utilidades no campo petrolífero.

Na indústria de petróleo e gás, a utilização do equipamento DTS, seja em aplicações downstream ou upstream, são baseadas na ampla possibilidade de aplicar e explorar as capacidades de um sistema DTS em realizar as medições distribuídas de temperatura. Pode-se evidenciar a interessante exploração do potencial de sistemas designados a sensoriamento de temperaturas multipontuais no monitoramento e em controle de processos, tais como [6;20,23]:

- Detectar zonas frias ou quentes ao longo de dutos;
- Localizar entupimento ao longo dos dutos;
- Monitorar bombas elétricas submersíveis (ESPs);
- Otimizar as operações de elevação artificial;
- Monitorar linhas de fluxo e risers para aplicações de controle de fluxo;
- Monitorar o perfil de temperatura do poço;
- Monitorar o perfil térmico da drenagem gravitacional assistida por vapor (SAGD);

- Monitoramento e controle de processos de medição de temperaturas em vasos, reatores, fornos, tubulações, entre outros.

-

2.9.1

Drenagem gravitacional assistida por vapor (SAGD)

A drenagem gravitacional assistida por vapor (SAGD) é uma abordagem de recuperação que está em crescente desenvolvimento, sendo cada vez mais utilizada. Este processo inicia-se com a injeção de vapor, que ao penetrar na rocha, aumenta a temperatura do óleo, diminuindo sua viscosidade e fazendo com que o mesmo flua de forma mais eficiente para a coluna de produção. A perda de pressão causada pela saída do óleo é compensada pelo vapor injetado. Os sensores a fibra óptica podem ser instalados ao longo dos tubos das instalações SAGD de forma única ou dupla.

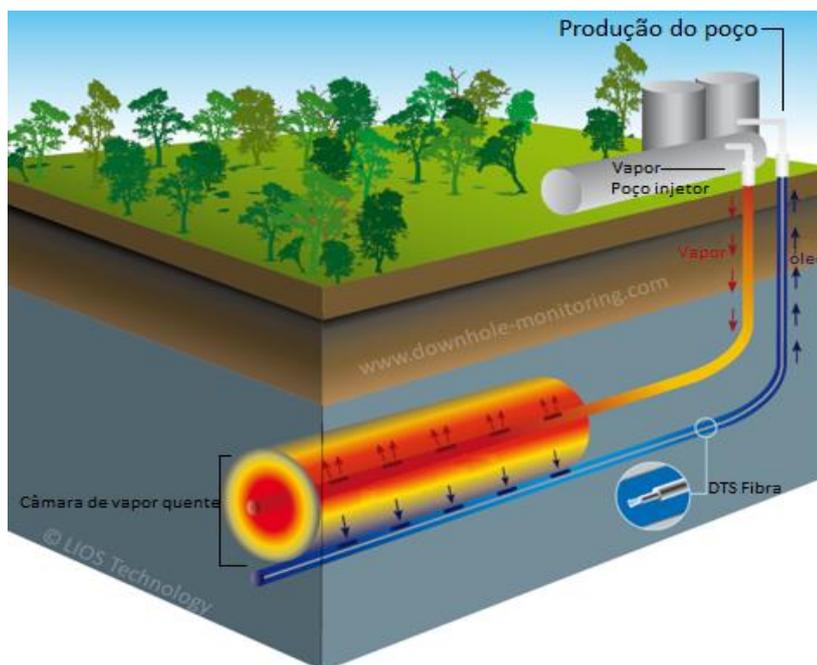


Figura 8 – Esquema ilustrativo da aplicação do SAGD (drenagem gravitacional assistida por vapor) sendo monitorado por um equipamento DTS. [24]

2.9.2

Poços horizontais

O sistema de sensoriamento a fibra óptica possui grande utilidade em poços horizontais. Este sistema caracteriza-se por obter os perfis de temperatura ao longo dos poços de petróleo, além de diagnosticar problemas na produção

dos mesmos, sendo capaz de aperfeiçoar as operações de estimulação e de limpeza. Devido à aquisição de dados de temperatura em tempo real, torna-se possível o controle do reservatório com maior eficiência, além da capacidade de detecção de vazamentos através de regiões com variações de temperatura. Qualquer ponto de entrada de vapor, gás ou água, poderá ser facilmente detectado e localizado através do monitoramento contínuo do perfil de temperatura.

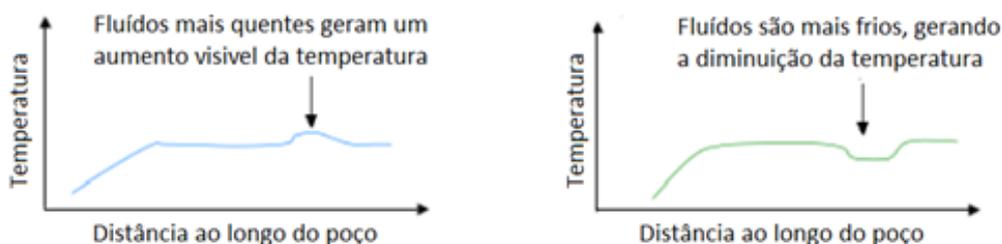


Figura 9 – Esquema ilustrativo de poços horizontais sendo monitorados por um equipamento DTS.

2.9.3 Elevação artificial

A instalação do sistema DTS permite a obtenção do perfil da temperatura ao longo dos poços e das zonas de interesse, além de permitir a detecção de pontos de injeção e de vazamentos, o que favorece o monitoramento em operações de elevação artificial que utilizam bombas, vapor, gás e outros. Estes eventos podem ser monitorados através do aquecimento ou resfriamento local causado pelo escoamento do fluido, elevado sob pressão. Outra importante aplicação das fibras ópticas com sistema DTS é o monitoramento da produção de gás. Esta tecnologia permite a detecção de possíveis vazamentos e entupimento de linhas de produção com maior eficácia [25].

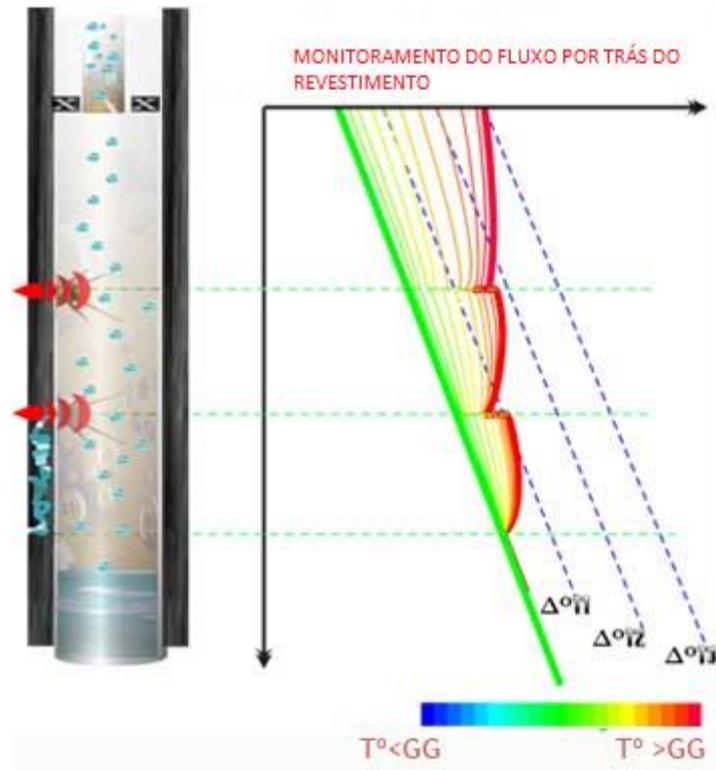


Figura 10 – Esquema ilustrativo de elevação artificial sendo monitorado por um equipamento DTS [28].

2.9.4 Assegurar o escoamento

O processo de transporte de óleo ou de gás é realizado através de tubulações muito extensas. Portanto, diversos fatores podem prejudicar o escoamento da produção, como por exemplo: o acúmulo de parafina e de outros elementos sólidos nas paredes dos dutos, erosão, corrosão das paredes internas dos dutos, formação de hidratos e asfaltenos, entre outros. Para monitorar e detectar a localização de tais problemas instalam-se fibras ópticas ao longo destes dutos com o objetivo de se realizar o sensoriamento distribuído da temperatura. À medida que as camadas de parafina se acumulam nas paredes internas, o perfil de temperatura do duto varia. Com isso, é possível localizar as zonas de entupimento, ou os pontos de vazamento ao longo dos dutos.

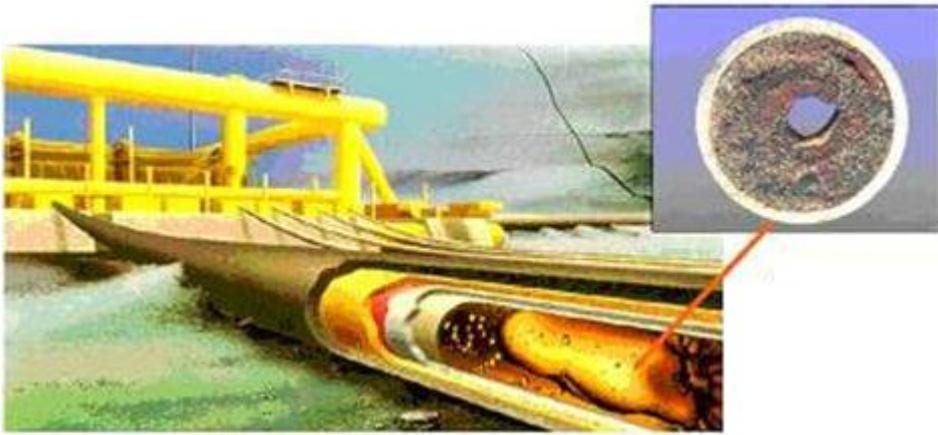


Figura 11 – Esquema ilustrativo de um duto sendo monitorado por um equipamento DTS, com intuito de assegurar o escoamento do fluido [26].

3 Relações do hidrogênio com as fibras ópticas

Perda induzida por hidrogênio é um fenômeno que baseia-se na difusão do hidrogênio na estrutura da fibra óptica, causando a absorção de luz na região do infravermelho.

Os primeiros casos reportados de perdas induzidas por hidrogênio datam de 1982 quando perdas inesperadas na transmissão do sinal óptico foram detectadas em uma pesquisa de campo. Nesta época, a causa ou origem de tais efeitos ainda não podiam ser explicados ou atribuídos à presença de hidrogênio. Somente após experimentos detalhados e profundas pesquisas foi possível estabelecer uma conexão entre a formação de gás hidrogênio e perdas na transmissão do sinal óptico [6;27;28].

O hidrogênio gasoso pode ser proveniente de diversas fontes, tais como [6;7;29]:

- Reações eletrolíticas entre elementos metálicos presentes nos cabos;
- Corrosão causada pela água em partes metálicas, como arames de tração;
- Evolução de gases oriundos de reações químicas entre materiais de revestimento dos cabos;
- Gás hidrogênio naturalmente presente no ambiente de trabalho.

Existem três mecanismos distintos capazes de promover perdas induzidas por hidrogênio:

- **Tipo I:** O mecanismo primário é a absorção da luz causada pela vibração molecular do hidrogênio ao difundir-se nos interstícios da estrutura molecular da sílica;
- **Tipo II:** Um mecanismo secundário se desenvolve pela formação de hidroxila (OH) proveniente da reação química entre moléculas de hidrogênio em alta temperatura e os elementos dopantes presentes na sílica, Germânio (GE), Fósforo (P) e Boro (B);
- **Tipo III:** Promovido pelos sítios de defeito presentes no núcleo da fibra óptica, originários da composição ou do processo de fabricação da mesma.

3.1

Efeitos do hidrogênio em baixa temperatura (H₂ intersticial)

No mecanismo de perda classificado como Tipo I, as moléculas livres de hidrogênio não são absorvidas na região do infravermelho, pois não possuem momento dipolo no estado gasoso. Entretanto, uma vez aprisionadas nos tetraedros da sílica, as moléculas apresentarão absorção correspondente às suas frequências de vibração.

Os picos de absorção são o resultado da combinação entre vibrações do hidrogênio e do dióxido de silício (sílica). A magnitude deste tipo de perda é linear à pressão de hidrogênio no ambiente. Após certo período de exposição, a perda atinge a saturação e não há mais aumento nas perdas de transmissão relacionado ao tempo de exposição ao hidrogênio [6].

A taxa e magnitude do aumento nas perdas para este tipo de mecanismo é ditado pelo processo de difusão do gás e, portanto, depende de quão rápido as moléculas de hidrogênio podem difundir-se do exterior para o núcleo da fibra óptica. Logo, a dimensão absoluta das perdas dependerá da pressão parcial de hidrogênio, da constante de difusão dos materiais que bloqueiam a passagem das moléculas de hidrogênio e da temperatura. Além disso, deve ser notado que este mecanismo é inversamente proporcional à temperatura, ou seja, enquanto a temperatura aumenta, os efeitos deste tipo de mecanismo diminuem e os efeitos do mecanismo Tipo II aumentam.

Devido à interação entre as moléculas de hidrogênio e vidro ser fraca, pois não há ligações químicas, as perdas associadas à absorção são reversíveis à temperatura ambiente. Se a fonte de hidrogênio for removida, as perdas se reduzirão proporcionalmente à difusão do hidrogênio para o exterior da fibra.

3.2

Efeitos do hidrogênio em alta temperatura (H₂ reativo)

Em elevadas temperaturas (>150°C), as moléculas de hidrogênio aprisionadas reagirão quimicamente com as moléculas dos gases dopantes presentes na fibra, como Germânio (Ge), Fósforo (P), e Boro (B), formando grupos de hidroxilos como hidróxido de silício (SiOH), hidróxido de germânio (GeOH) e hidróxido de fósforo (POH). Para cada um desses grupos, há um

comprimento de onda de absorção vibracional específico em 1.39 μm , 1.41 μm e 1.55 μm respectivamente [2;6].

As perdas ópticas causadas pelo mecanismo Tipo II são permanentes para temperaturas acima de 150°C. Tais perdas ocorrem em questão de poucas horas, em contraste com as perdas do mecanismo Tipo I, onde o processo demora alguns dias ou até semanas. A dimensão da perda depende da temperatura, pressão parcial de hidrogênio, composição do núcleo da fibra e do tempo de exposição. Geralmente, as perdas devido ao hidrogênio são monitoradas através da medição do aumento no pico de absorção em 1.41 μm [6;27;29].

Também constatou-se que, as fibras ópticas monomodo com núcleo de sílica pura, sem dopantes, ou com dopantes que não reajam com o hidrogênio, têm boa imunidade contra os efeitos das perdas induzidas por hidrogênio.

Visto que as ligações químicas são fortes e praticamente permanentes, as perdas devido ao hidrogênio podem permanecer mesmo que a fonte de hidrogênio seja removida. Logo, este mecanismo de perda é irreversível.

3.3

Efeitos do hidrogênio nos defeitos causados pelos dopantes na estrutura do vidro

Um terceiro mecanismo de perda por hidrogênio também foi reportado na literatura. Embora ainda não tenha sido completamente entendido ou estudado, pode ser descrito pelo resultado da interação entre as moléculas de hidrogênio e os defeitos na estrutura do vidro causados pela composição ou processo de fabricação.

Em geral, este mecanismo resulta em ampla perda de sinal óptico. Em elevadas temperaturas, os picos de atenuação no espectro de perda de sinal óptico estão presentes nos curtos comprimentos de onda e na região dos hidroxilos. Acredita-se ser produto da interação entre as moléculas de hidrogênio e os sítios de defeito causados pelos dopantes, Germânio (Ge) e Fósforo (P), na estrutura do vidro. Em temperatura ambiente e exclusivamente em fibras ópticas monomodo, as perdas são observadas na região dos hidroxilos e em 1.52 μm . Tais perdas são atribuídas aos defeitos na estrutura do vidro causados pelo processo de fabricação. Esses defeitos são o resultado de ligações quebradas de óxido de silício (SiO) formadas em elevadas temperaturas, que são portanto, congeladas no vidro a medida que o mesmo

resfria a partir do estado fundido. As ligações quebradas absorvem a luz na região do comprimento de onda de $630\mu\text{m}$. Defeitos como estes podem ser removidos através de tratamento de calor ou cuidado no processo de fabricação das fibras [6].

Os efeitos citados acima não foram reportados em fibras que não possuam Germânio ou Fósforo na composição de seu núcleo, como as de núcleo de sílica pura. Por isso, é extremamente recomendável o uso de tais fibras, tanto para evitar os efeitos do mecanismo Tipo III, como para eliminar os oriundos do Tipo II e reduzir, ao máximo, os causados pelo Tipo I.

3.4

Métodos de prevenção dos impactos do hidrogênio em fibras ópticas

Pesquisadores vêm estudando os efeitos causados pela difusão do hidrogênio em fibras ópticas, com o intuito de desenvolver métodos capazes de solucionar ou minimizar as causas relacionadas a este elemento. Dentre os métodos existentes, podem-se citar alguns, de forma sucinta:

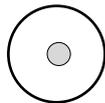
Para minimizar este fenômeno, podem-se alterar as composições dos dopantes utilizados em fibras ópticas, com o intuito de reduzir quimicamente a atenuação induzida. Pode-se, também, acrescentar aditivos nos núcleos das fibras ópticas, para que reajam juntamente com as moléculas de hidrogênio e produzam espécies que não absorvam luz na região de transmissão. Outros métodos poderiam ser: redesenhar e realizar uma melhor seleção dos materiais na produção dos cabos ópticos [7], o uso de ligas metálicas avançadas para evitar a possibilidade de geração de moléculas, ou átomos de hidrogênio com a presença do ácido sulfídrico, ou ainda, empregar revestimentos herméticos sobre as fibras ópticas para bloquear a difusão do hidrogênio. Porém, apenas o revestimento hermético não anula por completo o efeito de difusão do hidrogênio, podendo causar em longo prazo e em temperaturas elevadas, pequenas perdas da intensidade do sinal luminoso [2].

Mochizuki afirma, no caso da geração de hidrogênio devido a condensação da água confinada em cabos ópticos, que o problema pode ser superado pelo preenchimento intersticial dos sítios de defeitos, ou pela fabricação de cabos em circunstâncias secas [29].

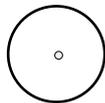
4 Metodologia

Nesta sessão foram apresentados os equipamentos, ferramentas e montagens experimentais utilizadas para o desenvolvimento dos testes experimentais propostos.

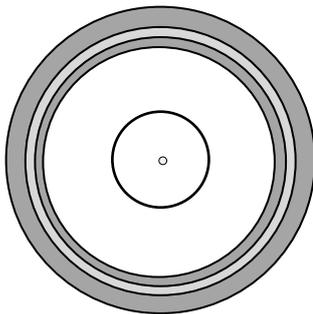
4.1 Fibras ópticas avaliadas



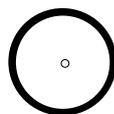
Fibra óptica multimodo com núcleo dopado com germânio (Ge) – (J-FIBER)



Fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura



Fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura em tubo de metal com diâmetro de 1/4" (FIMT)



Fibra óptica monomodo com núcleo dopado com germânio (Ge) revestida com carbono – (Acreo)

4.2 Equipamentos e Ferramentas utilizados

Nesta seção foram listados os equipamentos e as ferramentas utilizados para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

4.2.1 Equipamentos ópticos

4.2.1.1 Sensor distribuído de temperatura (DTS)

No presente trabalho, utilizou-se o equipamento Sensor distribuído de temperatura (DTS) da empresa Sensornet, modelo DTS - Sentinel - MEU (Multiplexer expansion unit), com características listadas pela Tabela 1 e foto ilustrativa na Figura 12.

Tabela 1 – Especificações do sensor distribuído de temperatura DTS – Sentinel – MEU.

PARAMETROS	VALORES
Faixa de operação	≈ 1.060 nm
Alcance	< 30 Km
Resolução espacial	1 m
Exatidão na temperatura	1 °C
Peso	5,7 kg



Figura 12 – Foto ilustrativa do equipamento DTS – Sentinel – MEU [22].

4.2.1.2 Analisador óptico de espectro (OSA)

O analisador óptico de espectro (OSA) utilizado é da empresa Anritsu, modelo MS9710B, fornece boa resolução da largura de banda e é capaz de cobrir uma larga faixa de comprimentos de onda entre 600-1750 nm com boa precisão. As características e a foto do equipamento são apresentadas pela Tabela 2 e Figura 13 respectivamente.

Tabela 2 – Especificações do analisador óptico de espectro OSA – MS9710B.

Faixa de medição	600 - 1750 nm
Precisão no comprimento de onda	50 Pm (1530 – 1570 nm)
MAX. RBW	70 Pm
RBW precisão (0.2 nm)	< 3% (1530 – 1570 nm)
Nível Level flatness	+/-0.1 dB (1530 – 1570 nm)
PDL	+/- 0.05 dB (Banda C)
Nível de linearidade	+/- 0.05 dB (Banda C)

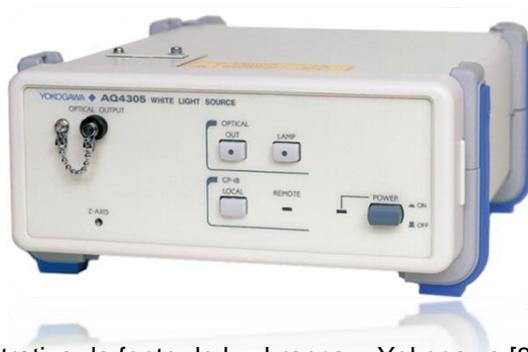
**Figura 13** – Foto ilustrativa do analisador óptico de espectro OSA – Anritsu [4].

4.2.1.3 Fonte de luz branca

A fonte de luz branca da empresa Yokogawa, modelo AQ4305 possui uma larga faixa de comprimento de onda (400 - 1800 nm), com características listadas na Tabela 3 e foto ilustrada na Figura 14.

Tabela 3 – Especificações da fonte de luz branca Yokogawa.

Faixa de comprimento de onda	400 – 1800 nm
Estabilidade de saída	± 0.05 dB (23 ± 2 ° C, após uma hora)
Interface	GPIB
Conector óptico aplicável	FC / PC
Lâmpada	Lâmpada de halogênio (DC12V / 50W)
Dimensão ((L) x (H) x (P))	(21,2 x 8,8 x 25) cm
Massa	Aproximadamente 3 kg

**Figura 14** – Foto ilustrativa da fonte de luz branca – Yokogawa [85].

4.2.2 Equipamentos Mecânicos

4.2.2.1 Câmara termo-hiperbárica

As câmaras termo-hiperbáricas são, em essência, cilindros metálicos resistentes à temperatura e pressão (estanques). A câmara utilizada no presente trabalho possui um raio externo útil de aproximadamente 12,5 cm, raio interno útil de 10 cm e altura útil de 1,65 cm, o que restringe suas aplicações ao uso de materiais que possuam volumes reduzidos. Tal equipamento é capaz de suportar pressões e temperaturas próximas às de um poço de petróleo (pressão e temperatura máxima de trabalho equivalente a 5000 psi e 350 °C), como apresentado pela Figura 15.



Figura 15 – Foto ilustrativa da câmara termo-hiperbárica aberta/fechada.

4.2.2.2 Espiral hermética

A espiral hermética é constituída por um tubo de aço inox, resistente a pressão e temperatura com capacidade máxima de trabalho equivalente a 2000 psi e 350 °C, com parede fina sem costura, comprimento de 45 metros e um diâmetro de 3/8". Esta espiral foi desenvolvida para encapsular fibras ópticas em tubo de metal com diâmetro igual ou menor a 1/4", assim como a FIMT utilizada. O espaçamento presente entre o tubo metálico externo (Espiral) e o tubo metálico interno (FIMT) permite a avaliação dos efeitos da difusão do hidrogênio em diferentes pressões, como ilustrado pela Figura 16.

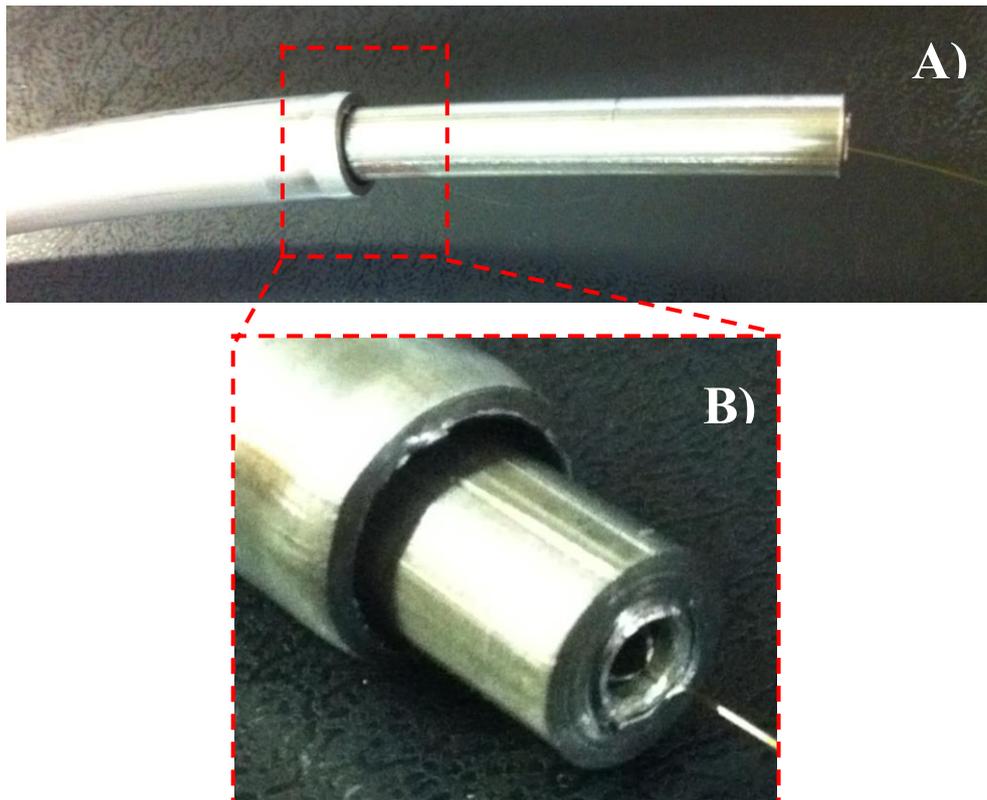


Figura 16 – Foto ilustrativa da montagem da espiral hermética: A) Foto ilustrativa da introdução da FIMT no tubo metálico de aço inox com diâmetro de 3/8"; B) Foto ilustrativa do espaçamento existente entre o tubo da FIMT e o tubo da espiral.

A Figura 17 apresenta a espiral hermética pronta para ser utilizada.



Figura 17 – Foto ilustrativa da espiral hermética dentro/fora da estufa.

4.2.2.3 Estufa reguladora de temperatura

A estufa reguladora de temperatura utilizada foi produzida pela empresa Nova Ética, modelo 400/4ND 300. Esta estufa possui um controlador e indicador digital de temperatura, capacidade de 100 litros, aquecimento por meio de resistências tubulares blindadas, sistema de circulação forçada de ar que garante uma boa homogeneização da temperatura, um sensor de temperatura do tipo Pt 100, resolução de 0,1°C, temperatura regulável de (ambiente + 15°C) a 300°C e uniformidade de $\pm 2^\circ\text{C}$, como ilustrado pela Figura 18.



Figura 18 – Foto ilustrativa da estufa reguladora de temperatura – Nova Ética [17].

4.2.2.4 Máquina universal de ensaios

A máquina universal de ensaios utilizada é da empresa Instron, modelo 5500R e possui uma capacidade máxima de tração de 900 mm. A Figura 19 apresenta uma imagem da máquina universal de ensaios:



Figura 19 – Foto ilustrativa da máquina universal de ensaios – Instron.

4.3 Ferramentas

1. Adesivo instantâneo (loctite 460);
2. Alicates para descascar fibras ópticas;
3. Álcool isopropílico;
4. Amarras plásticas e metálicas;
5. Bancada para montagem;
6. Carretel de madeira;
7. Chave de boca (13 mm, 27 mm e 30 mm);
8. Cilindros contendo gás hidrogênio, gás nitrogênio e gás hélio;
9. Clivador;
10. Computador para gerenciamento dos dados;
11. Conectores ópticos;
12. Desempenador de cabos;
13. Fita mágica;
14. Fita kapton;
15. Lenços especiais para fibra óptica (Kimwipes);
16. Manômetros;
17. Máquina de emenda;
18. Parafusos M-25 x 80 mm;
19. Protetores de emenda;
20. Resina metálica;
21. Reduções e cruzetas;

22. Tubo metálico de aço inox de 3/8", 1/4", 1/8" ;
23. Válvulas Reguladoras;

4.4 Montagens Experimentais

4.4.1 Montagem para avaliação do desempenho do equipamento DTS (1ª montagem experimental)

A primeira montagem foi utilizada para avaliar o desempenho do equipamento Sensor distribuído de temperatura (DTS) em função da difusão do hidrogênio. A avaliação constitui-se em monitorar periodicamente a temperatura de 900 metros da fibra óptica multimodo do tipo padrão (J-FIBER), à medida que o hidrogênio se difundia na mesma. Nesta primeira montagem utilizou-se o equipamento DTS, tubos metálicos para formar a linha de entrada e saída dos gases, uma estufa para manter a temperatura pré-estabelecida e uma câmara termo-hiperbárica como representado pela Figura 20:



Figura 20 – Esquema ilustrativo da 1ª montagem experimental.

Nesta montagem separou-se a fibra em três distintas seções: A seção A é constituída pelos primeiros 500 metros de fibra óptica que estão fora da estufa, à temperatura ambiente (aproximadamente 20°C) e conectada ao DTS. A seção B é formada pelos 200 metros seguintes, que estão localizados dentro da câmara termo-hiperbárica situada no interior da estufa reguladora. Os últimos 200 metros de fibra óptica compõem a seção C, que está localizada fora da câmara termo-hiperbárica, porém dentro da estufa reguladora de temperatura.

4.4.2

Montagem para avaliação da difusão do H₂ nas fibras ópticas, utilizando a câmara termo-hiperbárica (2ª montagem)

A segunda montagem teve como objetivo avaliar a difusão do hidrogênio na fibra óptica multimodo do tipo padrão (J-FIBER), fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura e na fibra óptica monomodo especiais com núcleo revestido com carbono (Acreo). Nesta montagem utilizou-se uma fonte de luz branca, um analisador óptico de espectro (OSA), tubos metálicos para formar a linha de entrada e saída dos gases, uma câmara termo-hiperbárica e uma estufa para manter a temperatura pré-estabelecida, como ilustrado pela Figura 21:

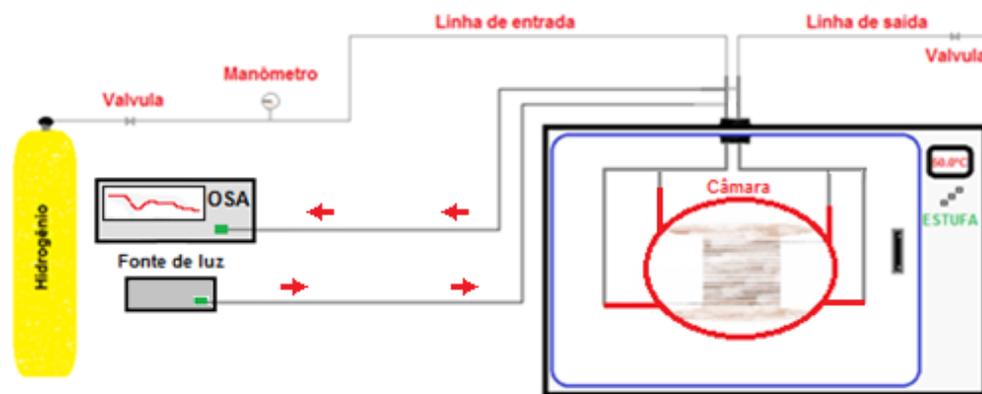


Figura 21 – Esquema ilustrativo da 2ª montagem experimental

Nesta montagem, uma das extremidades da fibra óptica foi acoplada à fonte de luz branca (entrada) e a outra ao OSA (saída). Realizaram-se três experimentos, separadamente, com o objetivo de testar 100 metros de fibra óptica multimodo do tipo padrão (J-FIBER), 60 metros de fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura e, posteriormente, 100 metros de fibra óptica monomodo especial com núcleo revestido com carbono (Acreo).

4.4.3

Montagem experimental utilizando o OSA e a espiral hermética (3ª montagem experimental)

A terceira montagem foi empregada para avaliar a difusão do hidrogênio na fibra óptica monomodo especial em tubo de metal com diâmetro

de 1/4" (FIMT). Esta montagem difere-se da segunda montagem, em relação ao formato da câmara termo-hiperbárica utilizada. Devido as dimensões da FIMT, desenvolveu-se a espiral hermética com diâmetro de 3/8", como ilustrado pela Figura 22.

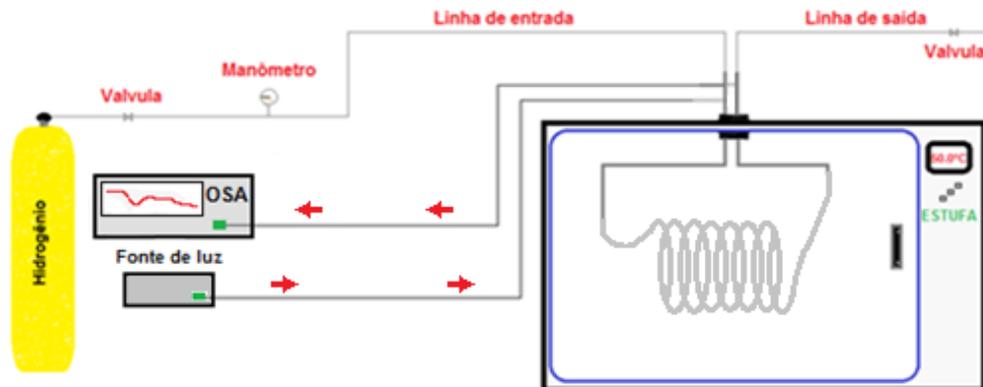


Figura 22 – Esquema ilustrativo da 3ª montagem experimental.

Observações:

Todas as montagens descritas permitem realizar processos de hidrogenação e desidrogenação. O processo de hidrogenação consiste em pressurizar o sistema com hidrogênio e a desidrogenação consiste em expulsar o hidrogênio do sistema através de um fluxo contínuo de nitrogênio. A avaliação dos efeitos de tais processos foi realizada quando não ocorreram mais mudanças no espectro de transmissão óptico da fibra, ou seja, no momento de estabilização.

Com o objetivo de garantir total segurança de todos os experimentos, testou-se a capacidade hermética de todas as montagens, antes da inicialização dos mesmos. Para isso, pressurizaram-se todas as montagens experimentais com gás hélio (He), pois o mesmo é um gás inerte. Após a conclusão deste processo, obteve-se a certeza de que as montagens estavam hermeticamente seguras.

4.5 Experimentos propostos

Considerando o grande número de testes realizados, os mesmos foram divididos em oito experimentos, onde foram especificados o tipo de fibra óptica utilizada e o número de testes de acordo com o objetivo de cada experimento.

Estes experimentos possibilitaram avaliar o equipamento DTS e os quatro tipos de fibra óptica com total segurança (pressão de H₂ e temperatura controlada).

4.5.1

Avaliação do perfil de atenuação em função da temperatura e pressão

Experimento – 1: Na primeira seção de testes avaliou-se a fibra óptica multimodo do tipo padrão (J-FIBER). Os testes fizeram uso da primeira e da segunda montagem experimental. Neste experimento, foram verificados os efeitos gerados pela alteração da temperatura enquanto a pressão se manteve constante, de acordo com a Tabela 4:

Tabela 4 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 1.

Experimento – 1	Pressão (psi)	Temperatura (°C)
Teste 1 – A	100 psi H ₂	30 °C
Teste 1 – B	100 psi H ₂	50 °C
Teste 1 – C	100 psi H ₂	70 °C
Teste 1 – D	100 psi H ₂	90 °C
Teste 1 – E	100 psi H ₂	110 °C
Teste 1 – F	100 psi H ₂	130 °C

Experimento – 2: A segunda sessão de testes teve o objetivo de avaliar a mesma fibra óptica analisada no Experimento – 1 e também utilizou a primeira e segunda montagem experimental, porém no Experimento – 2 analisou-se os efeitos causados pela variação da pressão enquanto a temperatura permaneceu constante, de acordo com a Tabela 5:

Tabela 5 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 2.

Experimento – 2:	Pressão (psi)	Temperatura (°C)
Teste 2 – A	60 psi H ₂	50 °C
Teste 2 – B	100 psi H ₂	50 °C
Teste 2 – C	150 psi H ₂	50 °C
Teste 2 – D	200 psi H ₂	50 °C
Teste 2 – E	250 psi H ₂	50 °C
Teste 2 – F	300 psi H ₂	50 °C
Teste 2 – G	350 psi H ₂	50 °C

Experimento – 3: A terceira sessão de testes avaliou a fibra óptica monomodo com núcleo de sílica pura. Os testes fizeram uso da segunda montagem experimental e verificou os efeitos gerados pela variação da temperatura enquanto a pressão se manteve constante, de acordo com a Tabela 6:

Tabela 6 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 3.

Experimento – 3	Pressão (psi)	Temperatura (°C)
Teste 3 – A	100 psi H ₂	30 °C
Teste 3 – B	100 psi H ₂	50 °C
Teste 3 – C	100 psi H ₂	70 °C
Teste 3 – D	100 psi H ₂	90 °C
Teste 3 – E	100 psi H ₂	110 °C
Teste 3 – F	100 psi H ₂	130 °C

Experimento – 4: A quarta sessão de testes teve o objetivo de avaliar a mesma fibra óptica analisada no Experimento – 3 e também utilizou a segunda montagem experimental, porém no Experimento – 4 analisou-se os efeitos causados pela variação da pressão enquanto a temperatura permaneceu constante, de acordo com a Tabela 7:

Tabela 7 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 4.

Experimento – 4:	Pressão (psi)	Temperatura (°C)
Teste 4 – A	60 psi H ₂	50 °C
Teste 4 – B	100 psi H ₂	50 °C
Teste 4 – C	150 psi H ₂	50 °C
Teste 4 – D	200 psi H ₂	50 °C
Teste 4 – E	250 psi H ₂	50 °C
Teste 4 – F	300 psi H ₂	50 °C
Teste 4 – G	350 psi H ₂	50 °C

Experimento – 5: Na quinta sessão de testes analisou-se a fibra óptica monomodo especial em tubo de metal (FIMT) através da utilização da terceira montagem experimental. Os testes foram realizados com o intuito de verificar as alterações geradas pela variação da temperatura enquanto a pressão se manteve constante, de acordo com a Tabela 8:

Tabela 8 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 5.

Experimento – 5:	Pressão (psi)	Temperatura (°C)
Teste 5 – A	100 psi H ₂	100 °C
Teste 5 – B	100 psi H ₂	200 °C
Teste 5 – C	100 psi H ₂	300 °C

Experimento – 6: Na sexta sessão de testes foram estudadas as mesmas fibras ópticas do Experimento – 5, entretanto avaliou-se as mudanças causadas pela variação da pressão enquanto a temperatura permaneceu constante, de acordo com a Tabela 9:

Tabela 9 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 6.

Experimento – 6:	Pressão (psi)	Temperatura (°C)
Teste 6 – A	100 psi H ₂	50 °C
Teste 6 – B	200 psi H ₂	50 °C
Teste 6 – C	300 psi H ₂	50 °C

Experimento – 7: Nesta sétima sessão de testes, a fibra óptica monomodo especial com revestimento de carbono foi analisada utilizando-se a segunda montagem experimental com o objetivo verificar os impactos gerados pelas alterações da temperatura enquanto a pressão permaneceu constante, de acordo com a Tabela 10:

Tabela 10 – Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 7.

Experimento – 7:	Pressão (psi)	Temperatura (°C)
Teste 7 – A	100 psi H ₂	100 °C
Teste 7 – B	100 psi H ₂	200 °C
Teste 7 – C	100 psi H ₂	300 °C

Experimento – 8: Na oitava sessão utilizou-se a mesma fibra óptica e montagem experimental utilizadas no Experimento – 7, porém o foco foi verificar os efeitos gerados pela variação da pressão enquanto a temperatura se manteve constante, de acordo com a Tabela 11 :

Tabela 11– Valores dos parâmetros de pressão e temperatura utilizados para o Experimento – 8.

Experimento – 8:	Pressão (psi)	Temperatura (°C)
Teste 8 – A	100 psi H ₂	50 °C
Teste 8 – B	200 psi H ₂	50 °C
Teste 8 – C	300 psi H ₂	50 °C

4.5.2 Avaliação das propriedades mecânicas

A avaliação das propriedades mecânicas teve como principal objetivo quantificar os níveis de esforço mecânico que a fibra óptica J-FIBER e a fibra óptica com núcleo de sílica pura suportam antes e após o processo de hidrogenação. O processo de hidrogenação foi constituído por: uma câmara de pressão, que alocou em seu interior a fibra óptica de interesse com gás hidrogênio durante 30 dias.

Nesta avaliação utilizou-se: a máquina universal de ensaios para aplicação da tração, quarenta corpos de prova (um metro de comprimento),

um par de bases metálicas, um par de parafusos M-25 x 80 mm e um adesivo instantâneo.

Desenvolveu-se uma montagem específica para a realização dos testes de tração mecânica, como ilustrado pela Figura 23. As bases metálicas serviram de suporte para fixar os parafusos à máquina universal de ensaios. As extremidades das fibras ópticas foram coladas com adesivo instantâneo nas roscas dos parafusos e em seguida as mesmas foram marcadas. Tal marcação foi realizada para evitar um possível escorregamento do acrilato ou da poliamida, pois este escorregamento invalida a medição.

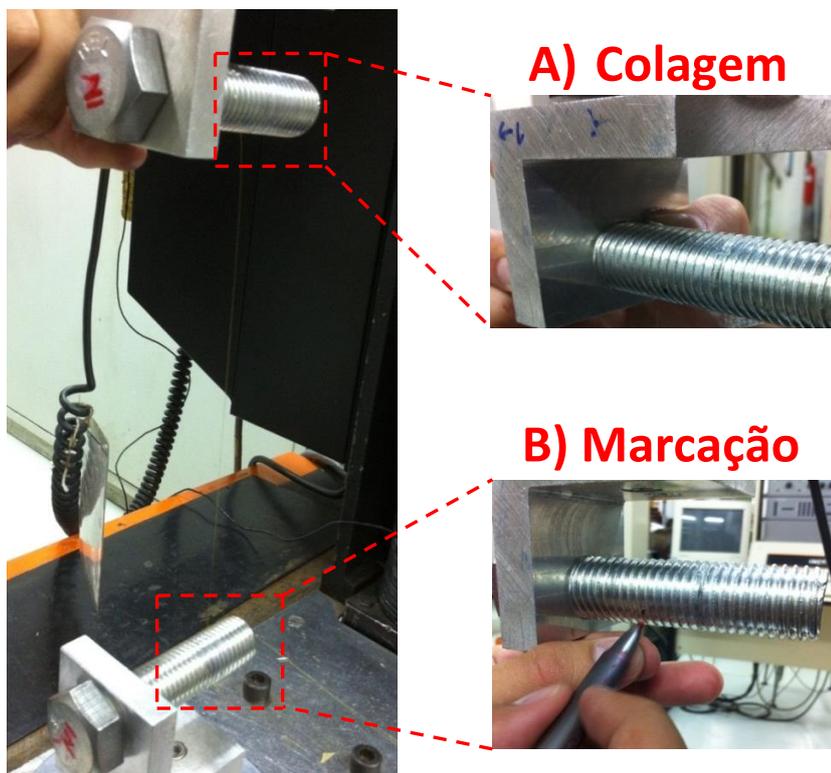


Figura 23 – Montagem experimental dos testes de tração mecânica: A) Fixação da fibra óptica (colagem); B) Marcação da fibra óptica.

Com o sistema montado, deu-se início aos testes experimentais, que funcionaram da seguinte forma: uma extremidade se manteve em repouso enquanto a outra se deslocou a uma velocidade de 4mm/min, exercendo esforços crescentes que alongaram os corpos de prova até a ruptura. Para garantir que os ensaios fornecessem bons resultados, todos os corpos de prova foram centralizados na máquina de modo que a carga fosse efetivamente aplicada na direção do seu eixo longitudinal.

5 Resultados e Discussões

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos pelos testes experimentais, descritos no capítulo anterior. Estes foram separados em três grupos: o primeiro grupo avaliou o desempenho do equipamento DTS em função da difusão de hidrogênio na fibra óptica multimodo (J-FIBER); o segundo grupo caracterizou as outras quatro fibras ópticas, multimodo (J-FIBER), monomodo com núcleo de sílica pura, monomodo em tubo de metal (FIMT) e monomodo revestida com carbono (Acreo), através da monitoração da atenuação do sinal óptico, quando submetidas a diferentes condições de temperatura e pressão de hidrogênio; e o terceiro grupo avaliou as propriedades mecânicas das fibras ópticas.

5.1

Avaliação do desempenho do equipamento DTS em função da difusão de hidrogênio em fibras ópticas

A avaliação do sensor distribuído de temperatura (DTS) foi realizada através dos seguintes experimentos: Experimento – 1 e Experimento – 2. Ambos os experimentos fizeram uso da primeira montagem experimental, representada pela Figura 20 e utilizaram a fibra óptica multimodo do tipo padrão (J-FIBER).

5.1.1

Avaliação do Experimento – 1 (pressão constante de 100psi de hidrogênio e temperatura variada)

Neste experimento avaliou-se 900 metros de fibra óptica multimodo (J-FIBER), separada em três distintas seções. A seção A foi definida pelos primeiros 500 metros de fibra, a Seção B, pelos 200 metros seguintes e os últimos 200 metros definiu-se como Seção C. A Figura 24 apresenta o gráfico do perfil de temperatura em função do comprimento da fibra óptica para diferentes momentos durante o processo de hidrogenação, correspondente ao Teste 1 – A do Experimento – 1.

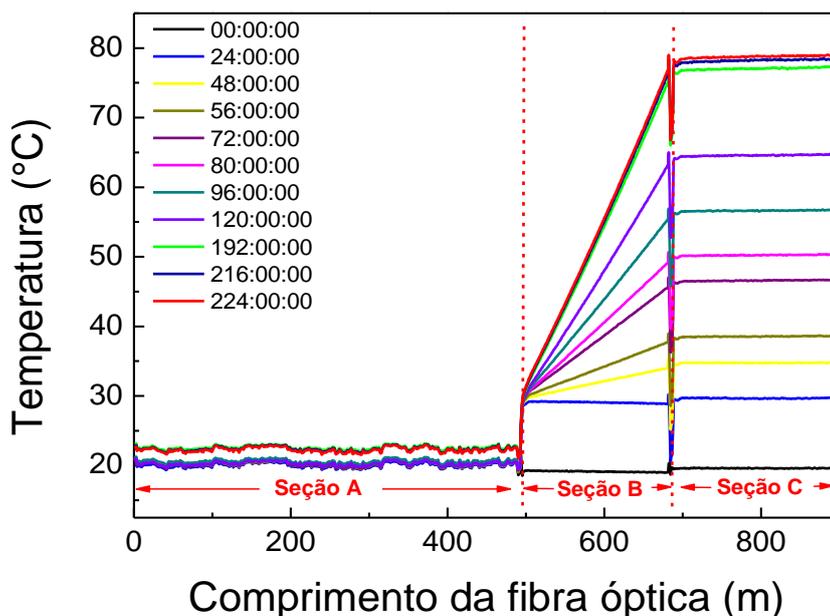


Figura 24 – Perfil de temperatura do Teste 1 – A. (pressão constante de 100psi e temperatura constante de 30°C).

A seção A apresenta um resultado coerente e real, pois estava localizada fora da estufa e a uma temperatura ambiente próxima de 20°C. A seção B, pressurizada com 100psi de hidrogênio a 30°C, apresenta um gradiente positivo da temperatura, devido a difusão do hidrogênio. Nota-se que a linha azul representada por 24 horas de teste permaneceu estável em 30°C, porém à medida que o tempo foi passando, o hidrogênio foi se difundindo na fibra óptica gerando um aumento gradativo da inclinação do gradiente de temperatura até a estabilização do processo de hidrogenação. No entanto, sabemos que esta medição não é real, pois a temperatura da estufa se manteve constante e homogênea. A seção C, que estava dentro da estufa a 30°C, porém não pressurizada, não apresentou um gradiente, mas também demonstrou um aumento da temperatura de forma errônea, pois a temperatura da estufa permaneceu constante durante 224 horas. Estes erros estão associados às atenuações induzidas nas componentes anti-Stokes e Stokes, devido ao processo de hidrogenação na seção B.

O gráfico da Figura 25 apresenta os resultados dos perfis de temperatura no momento da estabilização dos processos de hidrogenação e desidrogenação de todos os testes do Experimento – 1.

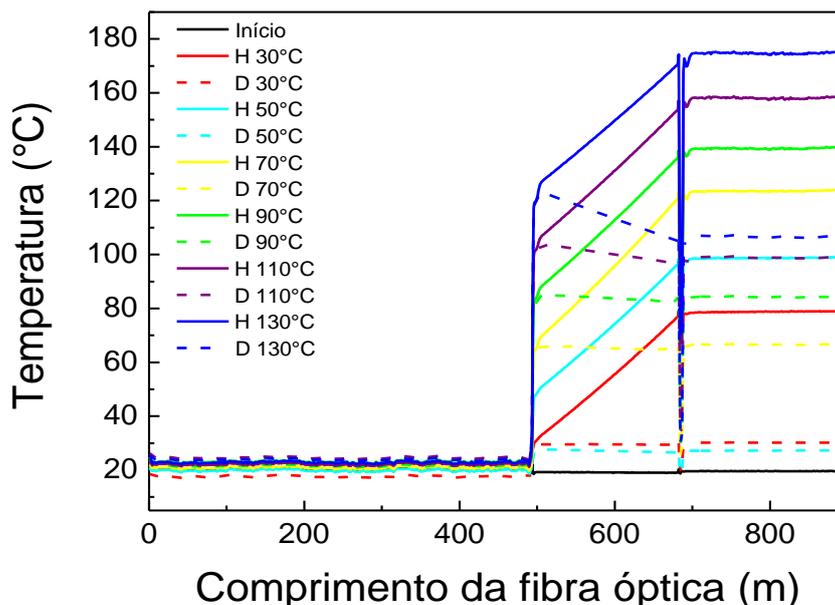


Figura 25 – Perfil de temperatura do Experimento – 1, com pressão constante de 100psi e temperatura variando de 30°C a 130°C(Somente o processo de hidrogenação foi pressurizado).

Pode-se observar que, no início da seção B, a temperatura aferida pelo DTS é coerente com a temperatura do teste. Entretanto, nos próximos metros verifica-se um gradiente positivo similar para todas as temperaturas no processo de hidrogenação (linhas solidas). Por outro lado, no processo de desidrogenação (linhas tracejadas), as temperaturas de 30°C a 70°C não apresentaram gradiente e nos testes de 70°C a 130°C observou-se um gradiente negativo, efeito que será entendido com os resultados que serão apresentados pela seção 5.2.1. Nota-se também que a seção C, localizada fora da câmara termo-hiperbárica, não apresentou gradiente algum, porém sofreu erro na leitura da temperatura. Esta leitura equivocada da temperatura, que se manteve constante na seção C, foi causada pelo efeito de difusão do hidrogênio na Seção B, processo no qual ocorre a perda de referência das intensidades de Raman. Isso nos leva a entender que o processo de difusão do hidrogênio não é axial, pois se este fosse o caso, a Seção C também apresentaria um gradiente positivo da temperatura. Conclui-se, portanto, que a difusão do hidrogênio ocorre de forma radial.

A Figura 26 esboça os valores das médias das temperaturas nas seções A e C, para cada teste, que foram verificados após a estabilização do processo de hidrogenação. Os erros induzidos na medição da temperatura da seção C são associados à descalibração das intensidades de Raman ocorrida na seção B.

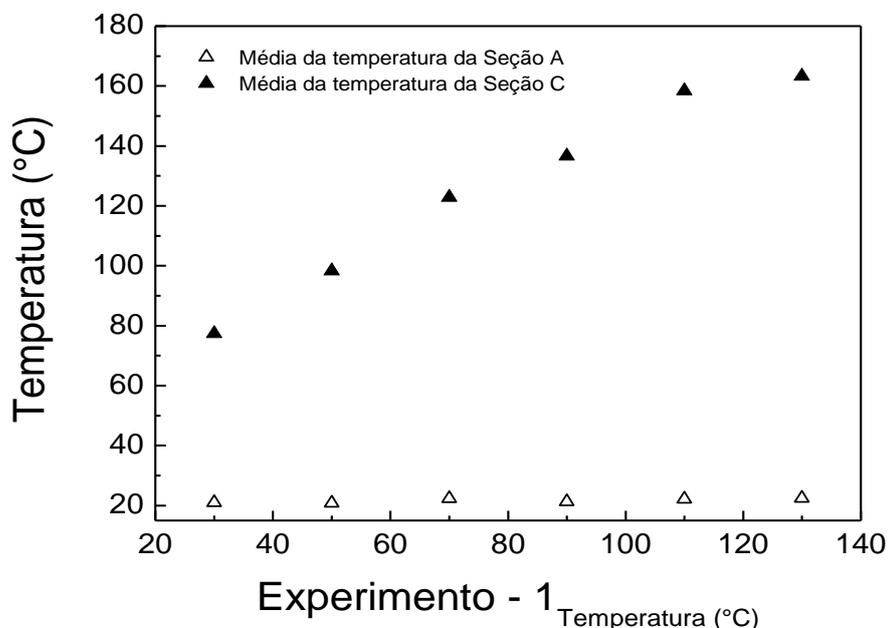


Figura 26 – Gráfico da média das temperaturas (°C) das seções A e C (pressão constante de 100psi e temperatura variando de 30°C a 130°C, com intervalos de 20°C).

Ao se realizar uma análise mais detalhada das componentes do espalhamento Raman da seção B, obtidos através do equipamento DTS, foi possível verificar que no momento de estabilização do processo de hidrogenação, a componente Stokes não sofreu variações significativas. Porém, a componente anti-Stokes apresentou alterações significativas em sua intensidade, que são associadas à dependência da temperatura existente nesta componente e aos efeitos de difusão do hidrogênio. Tais efeitos podem ser observados na Figuras 27.

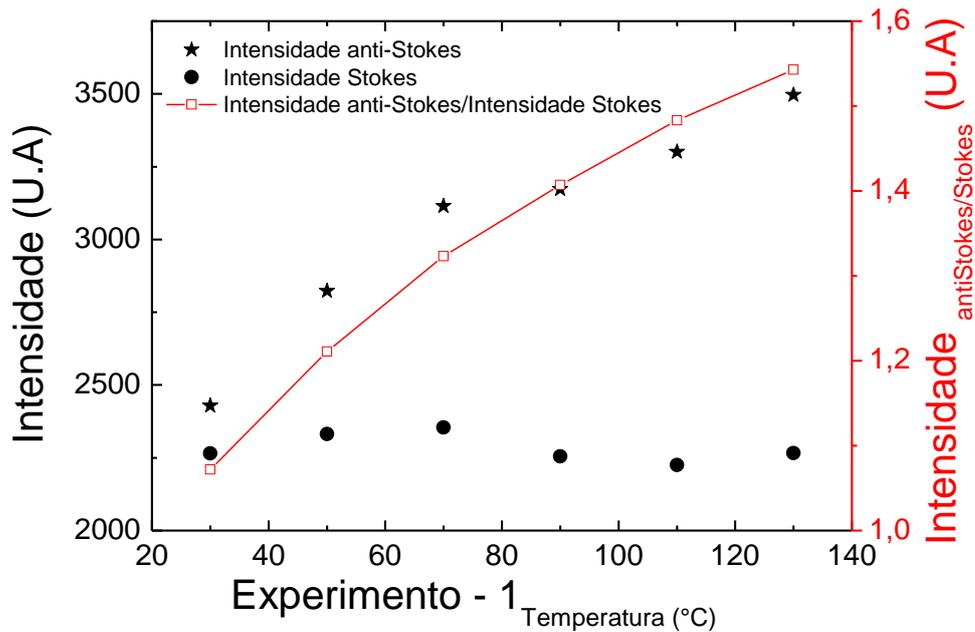


Figura 27 – Gráfico da variação das intensidades das componentes (anti-Stokes e Stokes) e da razão das mesmas em função da temperatura de cada teste.

Como pode ser observada, a variação da intensidade das componentes anti-Stokes e Stokes em função da temperatura (em °C) de cada teste forneceu um comportamento aproximadamente linear para as temperaturas de 30°C a 70°C e um comportamento não linear para as temperaturas de 90°C a 130°C. Esta variação observada na tendência das curvas, pode estar associadas as atenuações induzidas pelo hidrogênio. A Figura 27, também esboça através da linha vermelha, a razão entre as componentes de Raman, que é dependente da temperatura (Equação 7). Esta curva apresenta um comportamento similar a curva referente à seção C , exposta pela Figura 26.

5.1.2

Avaliação do Experimento – 2 (temperatura constante de 50°C e pressão de hidrogênio variada)

Nesta seção apresentou-se a continuação dos resultados referentes à avaliação do DTS. A Figura 28 esboça os perfis de temperatura referentes ao Experimento – 2, realizados de acordo com a Tabela 5.

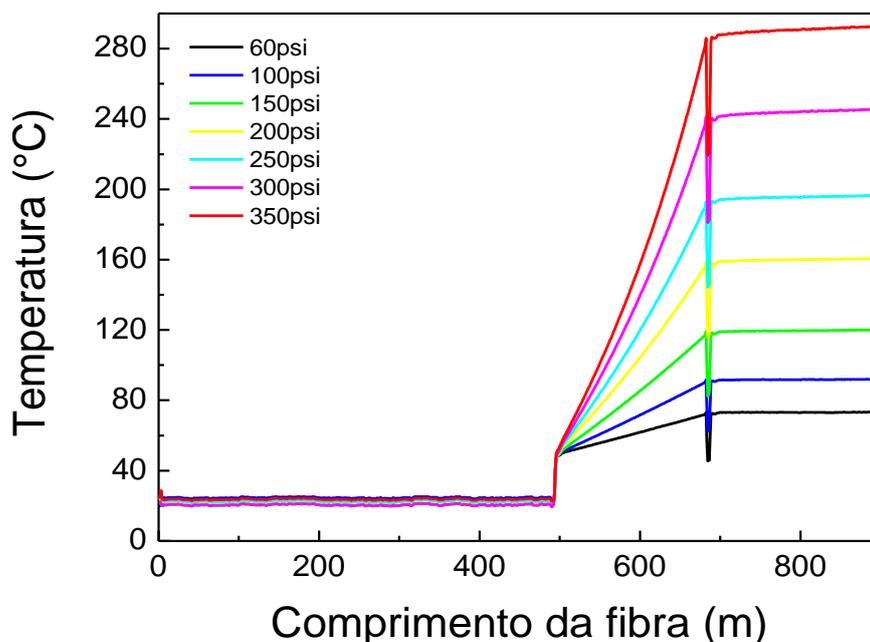


Figura 28 – Perfil de temperatura dos testes de 60psi a 350psi no processo de hidrogenação (temperatura constante de 50°C).

Podemos observar que conforme a pressão foi aumentando, ocorreu um aumento no gradiente de temperatura, que resultou em maiores erros na leitura de temperatura da seção C. Nos testes iniciais (até 100psi), o perfil de temperatura é aproximadamente linear, como tinha sido observado no Experimento – 1. No entanto, para pressões acima de 150psi, é possível observar uma tendência não linear. Tal fenômeno pode ser melhor observado na Figura29, que representa a seção B.

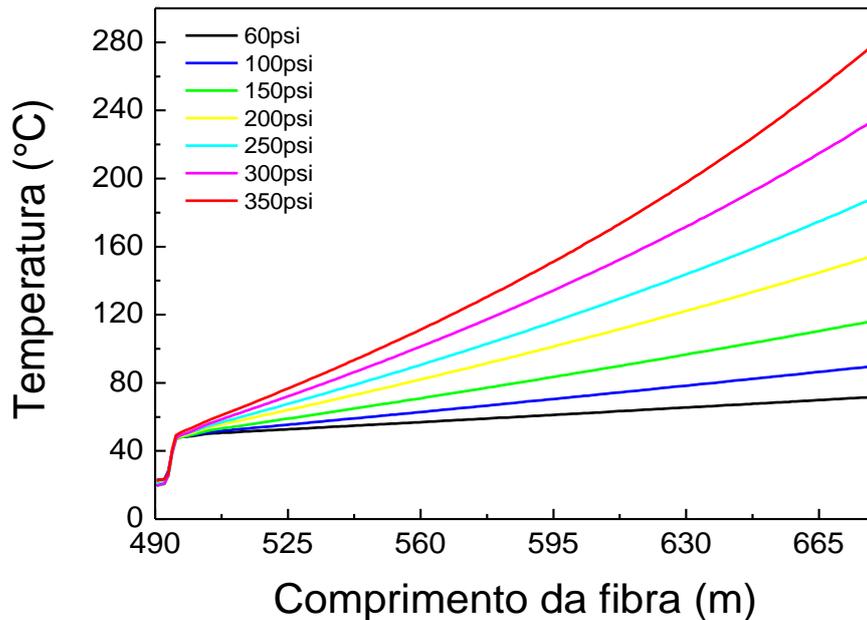


Figura 29 – Perfil de temperatura dos testes de 60psi a 350psi no processo de hidrogenação referente à seção B (temperatura constante de 50°C).

Considerando os resultados obtidos no Experimento – 1 e Experimento – 2, pode-se constatar que o efeito da difusão do hidrogênio na fibra óptica ocorre apenas de forma radial, induzindo erros na determinação da temperatura e comprometendo a confiabilidade do equipamento DTS. Estes erros dependem de fatores como a pressão de hidrogênio e a temperatura. Além disso, também foi observado que, quanto maior for a pressão de hidrogênio, maior será o erro induzido na determinação da temperatura.

5.2

Caracterização do espectro de atenuação das fibras ópticas em função da difusão de hidrogênio sob diferentes condições de temperatura e pressão

Os erros na determinação da temperatura, discutidos na seção 5.1, motivaram a caracterização do perfil de atenuação para diferentes pressões de hidrogênio e temperatura das fibras, com o intuito de analisar como o efeito da difusão do hidrogênio afeta cada tipo de fibra óptica.

5.2.1

Variações da temperatura com pressão constante de 100psi de hidrogênio

Inicialmente, realizaram-se os testes referentes aos seguintes experimentos: Experimento – 1, listado pela Tabela 4; Experimento – 3, listado pela Tabela 6; Experimento – 5, listado pela Tabela 8; Experimento – 7, listado pela Tabela 9. Nestes experimentos analisou-se o espectro de atenuação de cada fibra óptica para cada temperatura proposta, na faixa de comprimento de onda entre 1000 nm e 1600 nm.

5.2.1.1 Fibra óptica multimodo do tipo padrão

A Figura 30 apresenta o espectro de atenuação referente à fibra óptica multimodo do tipo padrão (J-FIBER) submetida a 30°C e pressão constante de 100psi .

As linhas apresentadas pelos espectros correspondem aos seguintes momentos: a linha preta (normalizada) corresponde ao momento inicial dos testes, ou seja, sem pressão de hidrogênio; a linha vermelha ao momento em que o processo de hidrogenação atinge a saturação; e a linha azul ao momento em que o processo de desidrogenação se estabiliza.

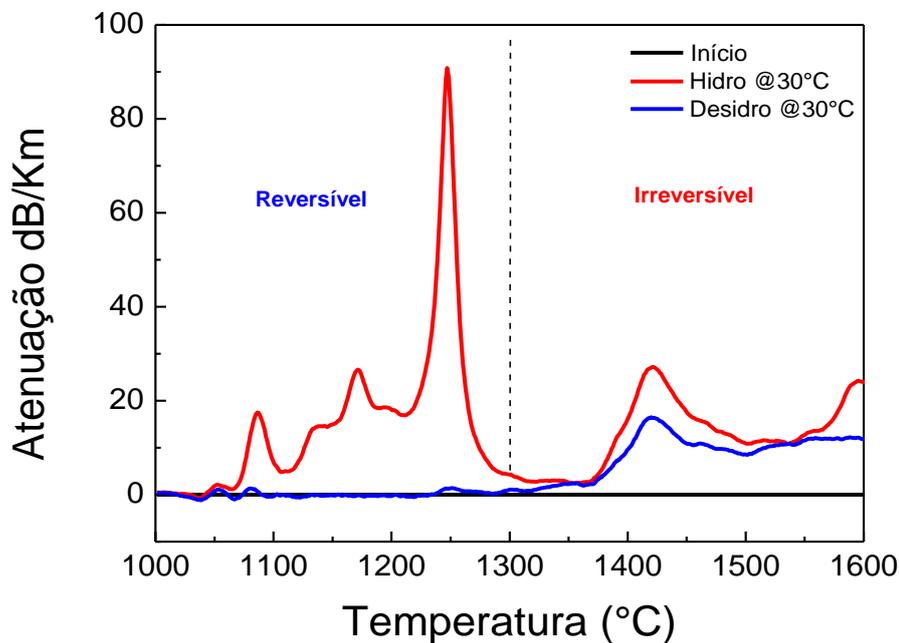


Figura 30 – Espectro de atenuação da fibra óptica multimodo do tipo padrão em função do comprimento de onda (30°C com 100psi de hidrogênio).

Observando a linha vermelha, pode-se concluir que o espectro, como um todo, foi afetado pela difusão de hidrogênio. A região entre 1000 nm e 1050 nm

foi a menos afetada e o comprimento de onda mais afetado foi o de 1247 nm, que está associado à absorção da energia luminosa do sinal óptico pelas moléculas de hidrogênio presentes nos interstícios da fibra óptica, porém outros comprimentos de onda também foram afetados. Na Figura 30, foram ressaltadas as componentes Stokes (1019 nm) e anti-Stokes (1109 nm) do espalhamento Raman. Pode-se observar que a componente anti-Stokes foi a mais afetada pela difusão do hidrogênio, fato que comprova os erros verificados pela seção 5.1.

Após o processo de desidrogenação, representado pela linha azul, observaram-se duas regiões distintas: a primeira região, definida pelos comprimentos de onda entre 1000 nm e 1300 nm, foi a mais afetada pelas atenuações e apresentou uma resposta reversível. Entretanto, a segunda região, definida pelos comprimentos de onda entre 1300 nm e 1600 nm, se caracterizou por uma resposta irreversível.

Em baixas temperaturas, a região reversível desta fibra, sofreu absorção da luz devido à vibração molecular do hidrogênio que se difundiu nos interstícios de sua estrutura. Já a segunda região, caracterizada como irreversível, sofreu atenuações devido às formações de hidroxilas (OH). Efeito proveniente da interação do hidrogênio com os dopantes presentes no núcleo da fibra.

A Figura 31 apresenta o espectro de atenuação referente ao Teste 1 – F, que mostra o resultado mais extremo obtido no Experimento – 1, possibilitando verificar que esta fibra sofreu grandes atenuações irreversíveis.

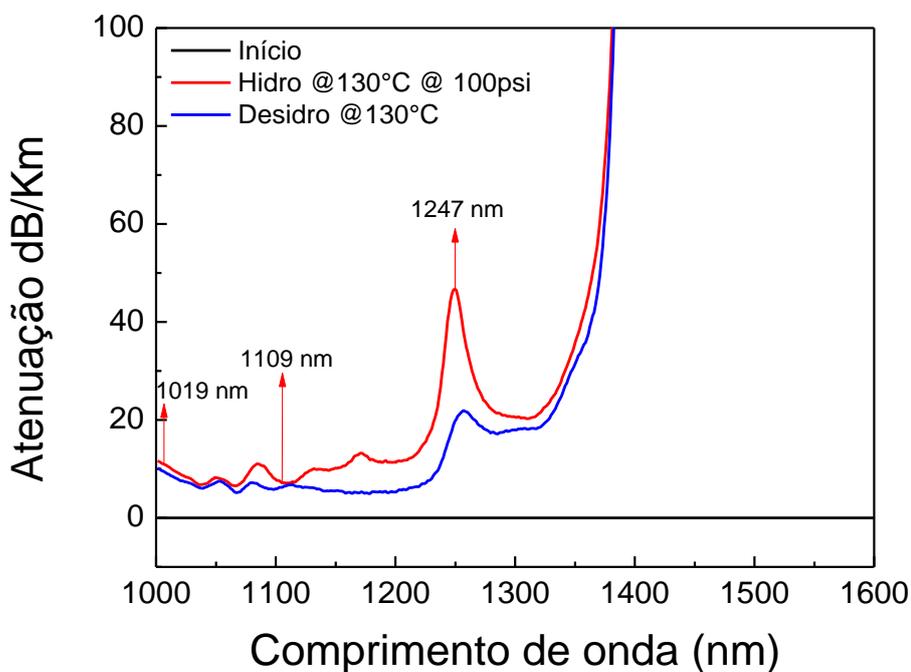


Figura 31 – Espectro de atenuação da fibra óptica multimodo do tipo padrão obtido através do OSA (130°C com 100psi de hidrogênio).

Estas atenuações estão associadas aos três distintos mecanismos que são capazes de promover perdas induzidas por hidrogênio: o primeiro mecanismo pode ser visualizado principalmente no comprimento de onda de 1247 nm e nos harmônicas existentes na primeira região, definida anteriormente como região reversível; o segundo mecanismo, que neste caso predominou, pode ser observado no comprimentos de onda de 1300 nm a 1600nm da Figura 31, que sofreu perdas irreversíveis e altamente severas devido à formação de hidroxilas provenientes das reações químicas entre as moléculas de hidrogênio e os elementos dopantes presentes na sílica; e o terceiro mecanismo foi promovido pelos sítios de defeito presentes no núcleo da fibra óptica, originários da composição ou do processo de fabricação, que se desenvolveu em toda a faixa de operação analisada (1000 nm a 1600 nm). Os comprimentos de onda de 1019 e 1109 nm destacados pela Figura 31 apresentaram alterações irreversíveis do sinal óptico, que justificam o gradiente negativo encontrado na fase de desidrogenação da seção B, referentes aos testes: Teste 1 – E e Teste 1 – F.

Como observado nas Figuras 25 e 28, o gradiente de temperatura é resultado do erro presente no cálculo da razão das componentes de Raman, utilizadas pelo DTS para mensurar a temperatura. Tais componentes são afetadas de formas diferentes pela difusão de hidrogênio, como pode ser observado nas Figuras 30 e 31. A partir desta análise, conclui-se que ao utilizar o DTS, torna-se necessário dispor de uma fibra óptica, que seja imune aos efeitos induzidos pela difusão do hidrogênio.

5.2.1.2

Fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura

A Figura 32 mostra o espectro de atenuação do teste 3 – A referente ao processo de hidrogenação e desidrogenação a 30°C.

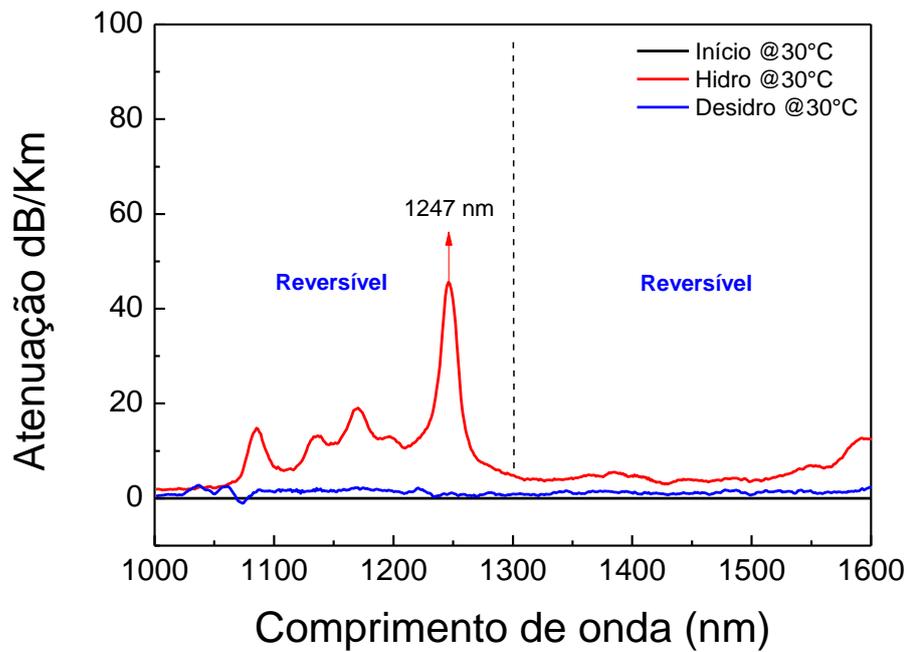


Figura 32 – Espectro de atenuação da fibra óptica monomodo com núcleo de sílica pura em função do comprimento de onda. (30°C com 100psi de hidrogênio)

Observando o espectro de atenuação referente à saturação do processo de hidrogenação (linha vermelha), nota-se que, novamente, o primeiro tom (1247 nm) foi o comprimento de onda mais afetado em baixas temperaturas. Com o processo de desidrogenação (linha azul), verificou-se que, a intensidade dos espectros ópticos de ambas as regiões retornaram para o nível de intensidade inicial, resultando em duas regiões de perdas reversíveis.

A Figura 33 apresenta o espectro de atenuação do Teste 3 – F referente ao processo de hidrogenação e desidrogenação a 130°C.

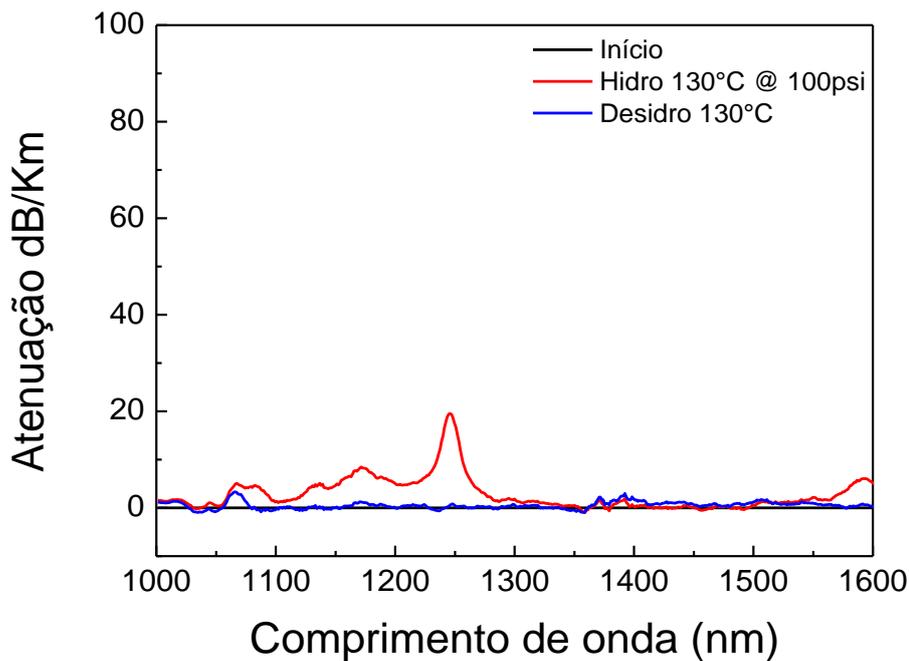


Figura 33 – Espectro de atenuação da fibra óptica monomodo com núcleo de sílica pura em função do comprimento de onda (130°C com 100psi de hidrogênio).

A análise deste espectro nos permite compreender que, no processo de hidrogenação e desidrogenação, o comportamento da fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura a 130°C foi similar ao seu comportamento a 30°C, isto é, em ambas as temperaturas, as atenuações induzidas pelo hidrogênio foram reversíveis.

A figura 34 representa em um só gráfico, todos os testes do Experimento – 3.

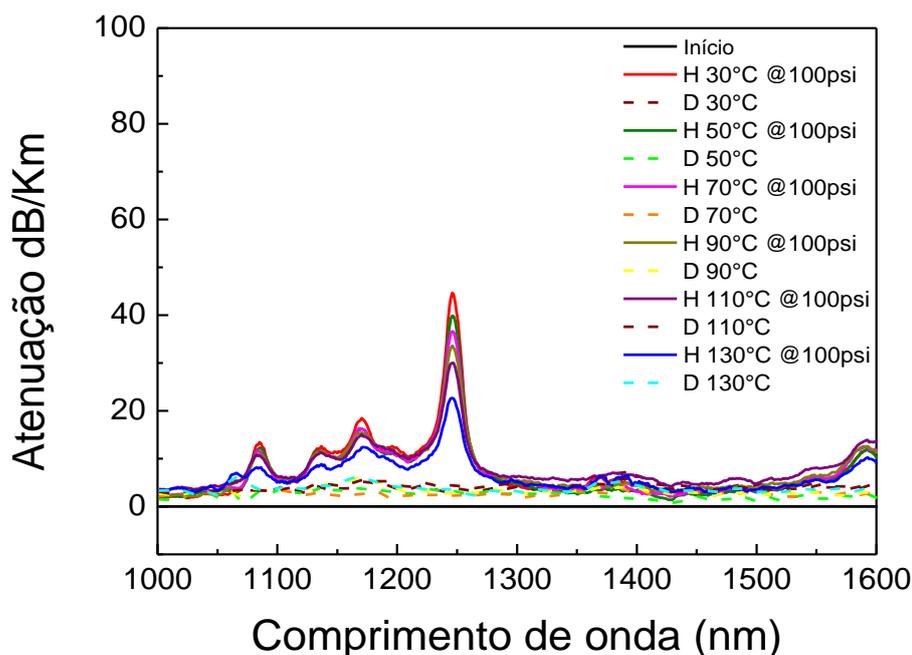


Figura 34 – Espectro de atenuação da fibra óptica monomodo com núcleo de sílica pura em função do comprimento de onda (temperatura variando entre 30°C e 130°C com 100psi), Somente o processo de hidrogenação foi pressurizado.

Ao analisarmos os espectros das diferentes temperaturas estudadas, observa-se que a atenuação do sinal óptico é inversamente proporcional à temperatura, ou seja, quanto maior for a temperatura, menor é a atenuação verificada no espectro de hidrogenação (linhas sólidas). Já nos espectros de desidrogenação (linhas tracejadas), nota-se que, em todas as temperaturas, as atenuações induzidas pelo hidrogênio foram reversíveis. A principal diferença desta fibra em relação às fibras ópticas J-FIBER é a sua composição estrutural, pois como o próprio nome indica, a mesma não apresenta dopantes em seu núcleo, impossibilitando a formação de hidroxilas (OH), reação química irreversível.

A Figura 35 esboça dois gráficos referentes à intensidade em 1247 nm em função do tempo de estabilização do Teste 3 – A. A Figura 35.A corresponde ao processo de hidrogenação, realizado à pressão constante de 100psi de hidrogênio e temperatura constante de 30°C e a Figura 35.B refere-se ao processo de desidrogenação, realizado a temperatura constante de 30°C.

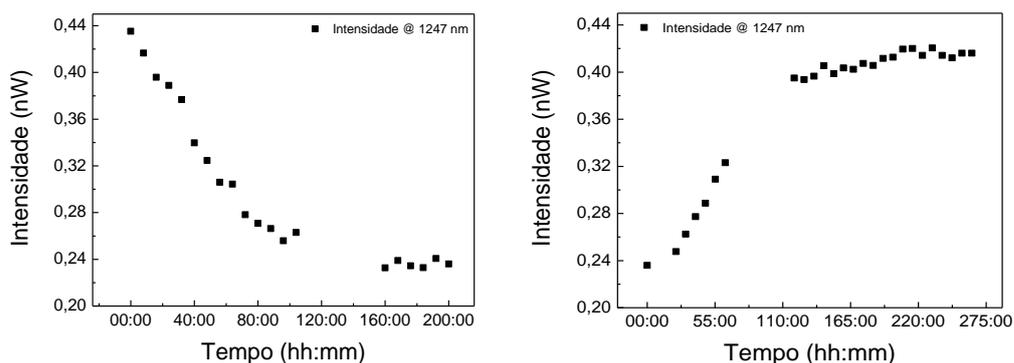


Figura 35 – Gráfico da intensidade em 1247 nm em função do tempo no Teste 3 – A. Figura 35.A refere-se ao processo de hidrogenação e o Figura 35.B é referente ao processo de desidrogenação.

Através da Figura 35.A, pode-se observar que à medida que o hidrogênio vai se difundindo nos interstícios da estrutura molecular da fibra óptica, a intensidade de transmissão do sinal óptico vai decrescendo exponencialmente. Analogamente, a Figura 35.B nos mostra que à medida que o hidrogênio foi expelido dos interstícios da fibra óptica, ocorreu uma recuperação da intensidade do sinal óptico com tendência exponencial crescente, comprovando que o primeiro tom sofreu um efeito reversível.

A figura 36 ilustra o tempo de estabilização em função da temperatura do processo de hidrogenação (Figura 36.A) e desidrogenação (Figura 36.B) de cada teste do Experimento – 3.

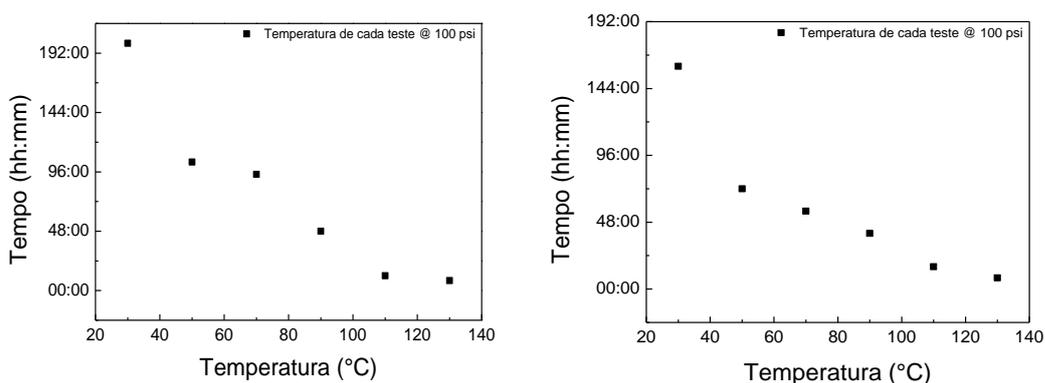


Figura 36 – Gráfico do tempo de estabilização em função da temperatura. A Figura 36.A refere-se ao processo de hidrogenação e a Figura 36.B é referente ao processo de desidrogenação.

Ao analisar os gráficos, pode-se observar que o tempo de estabilização de cada teste foi inversamente proporcional ao aumento da temperatura, ou seja, tanto o processo de hidrogenação como o de desidrogenação foram acelerados com o aumento da temperatura e ambos os processos tiveram comportamentos similares.

Ao final dos testes do Experimento – 3, verificou-se que a intensidade do sinal luminoso, de uma maneira geral, sofreu menor atenuação com o aumento da temperatura. A Figura 37 mostra a intensidade correspondente ao comprimento de onda de 1247 nm para cada temperatura dos testes realizados.

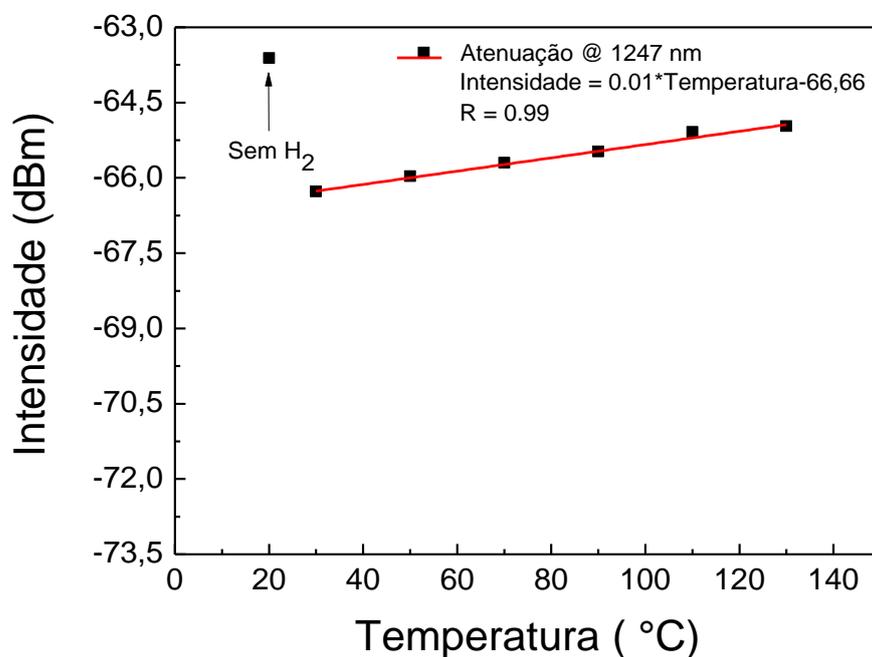


Figura 37 – Gráfico das intensidades em 1247 nm em função da temperatura (temperatura variando de 30°C a 130 C° com 100psi).

Nesta figura pode se observar uma relação linear da intensidade (em dBm) em função da temperatura (em °C), com taxa de variação de 0,01 dBm/°C e coeficiente de correlação da reta igual a 0,99.

Como descrito anteriormente, os testes são baseados em variáveis como pressão e temperatura. O processo de difusão do hidrogênio torna-se mais rápido ou mais lento dependendo do comportamento de tais variáveis, para melhor entender este processo, realizou-se uma discussão mais detalhada.

A concentração das moléculas de hidrogênio e a taxa com que as mesmas se difundem no núcleo da fibra óptica, dependem da pressão e da temperatura. O limite de solubilidade (concentração de hidrogênio saturado no núcleo da fibra óptica), representado por ρ_{H_2} (ppm) é calculado através da seguinte equação [42]:

$$K_{sat} = A p \exp\left(\frac{B}{RT}\right) \quad (10)$$

Onde:

- A = Constante para sílica 3,841;
- B = Constante para sílica 8670;
- p = é a pressão do gás de hidrogênio em atm;
- R = Constante universal dos gases perfeitos (8.3144 J/mol.K);
- T = Temperatura em Kelvin.

Como se pode observar, a solubilidade do gás hidrogênio na sílica é diretamente proporcional à pressão e inversamente proporcional à temperatura. Efeito que explica as Figuras 34 e 37.

Para uma melhor compreensão da Figura 36, apresentou-se a equação que define a difusão das moléculas de hidrogênio na sílica, por [42]:

$$d_{H_2} = C \exp\left(\frac{-D}{RT}\right) \quad (11)$$

Onde:

- C = Constante para sílica $2,83 \cdot 10^{-4}$;
- D = Constante para sílica 40190;
- p = é a pressão do gás de hidrogênio em atm;
- R = Constante universal dos gases perfeitos (8.3144 J/mol.K);
- T = Temperatura em Kelvin.

Considerando esta equação nota-se que a estabilização da solubilidade também é inversamente proporcional a altas temperaturas, isto é, em elevadas temperaturas a estabilização da solubilidade é alcançada em poucas horas.

5.2.1.3

Fibra óptica monomodo especial em tubo de metal (FIMT)

A fibra óptica utilizada por esta montagem é a mesma fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura avaliada na seção anterior, porém encontra-se encapsulada em um tubo metálico (FIMT). O objetivo do Experimento – 5 foi avaliar a hermeticidade deste tubo metálico sob a difusão do hidrogênio.

A Tabela 8 apresenta os testes do Experimento – 5, que utilizou a terceira montagem representada pela Figura 22, com pressão constante de 100psi de hidrogênio e temperatura variando de 100°C a 300°C. A Figura 38 mostra os resultados obtidos em todos os testes do Experimento – 5.

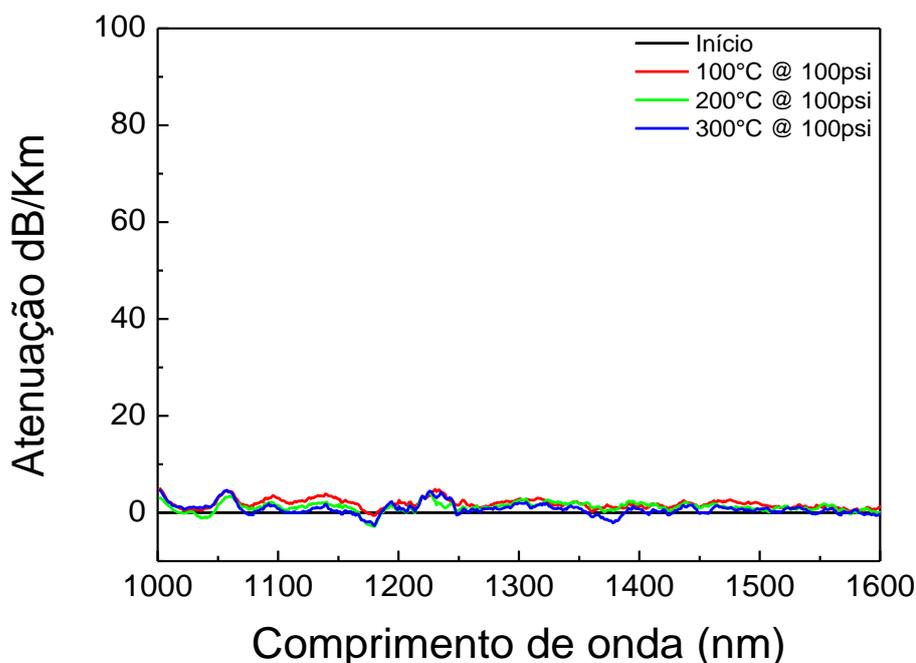


Figura 38 – Espectro da atenuação da fibra FIMT em função do comprimento de onda (100psi com temperatura variando de 100°C a 300 C°).

A Figura 38 apresenta os espectros de atenuação dos testes, que possibilitaram confirmar as citações descritas pela literatura. Como pode-se observar, esta fibra não sofreu nenhuma alteração significativa em seu espectro óptico de transmissão, comprovando assim, a eficiência do revestimento hermético ao ser submetido por aproximadamente 45 dias a altas temperaturas (300°C) com a presença de hidrogênio(100psi).

5.2.1.4

Fibra óptica monomodo especial com revestimento de carbono

A Tabela 10 do quarto capítulo apresenta os testes do Experimento – 7, que fez uso da segunda montagem experimental representada pela Figura 21. A finalidade deste experimento foi investigar a influência da difusão do hidrogênio sobre as fibras ópticas monomodo especiais com revestimento de carbono (Acreo), que possui núcleo dopado com germânio. Estes testes foram realizados à pressão constante de 100psi de hidrogênio e temperatura variando de 100°C a 300°C, como apresentado pela Figura 39.

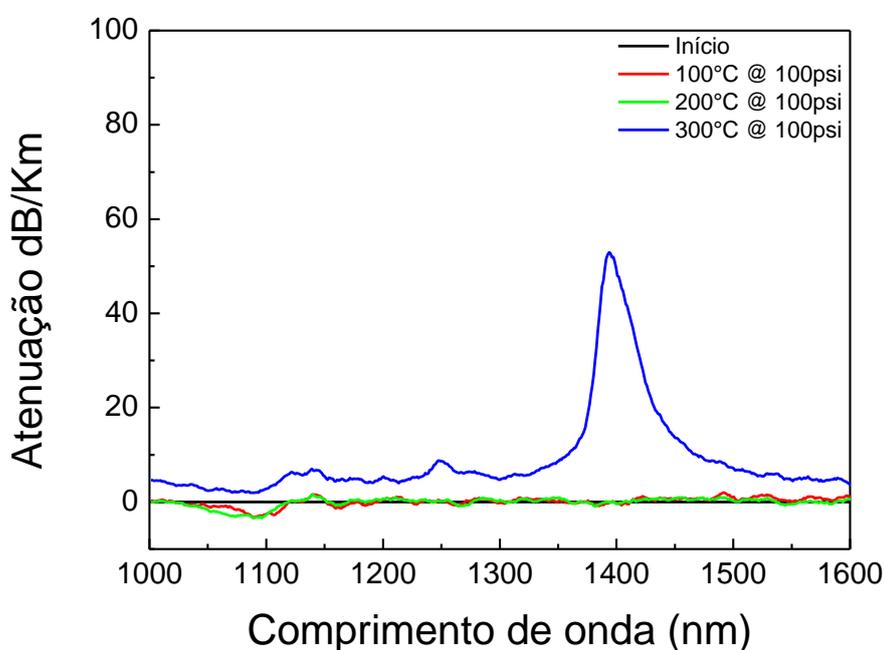


Figura 39 – Espectro da atenuação fibra óptica monomodo especial com revestimento de carbono em função do comprimento de onda (100psi com temperatura variando de 100°C a 300 C°).

Os resultados do Experimento – 7 evidenciaram que o espectro óptico não sofreu atenuações para temperaturas iguais ou inferiores a 200°C, o que indica, que a camada de carbono amorfo que reveste a fibra óptica, garantiu a blindagem da mesma por 30 dias. No entanto, quando a temperatura foi elevada para 300°C (linha azul), o espectro apresentou atenuação ao longo de toda faixa espectral, com destaque para a região próxima a 1390 nm.

A Figura 40 apresenta a variação da intensidade correspondente ao comprimento de onda 1390 nm, à medida que o hidrogênio foi se difundindo.

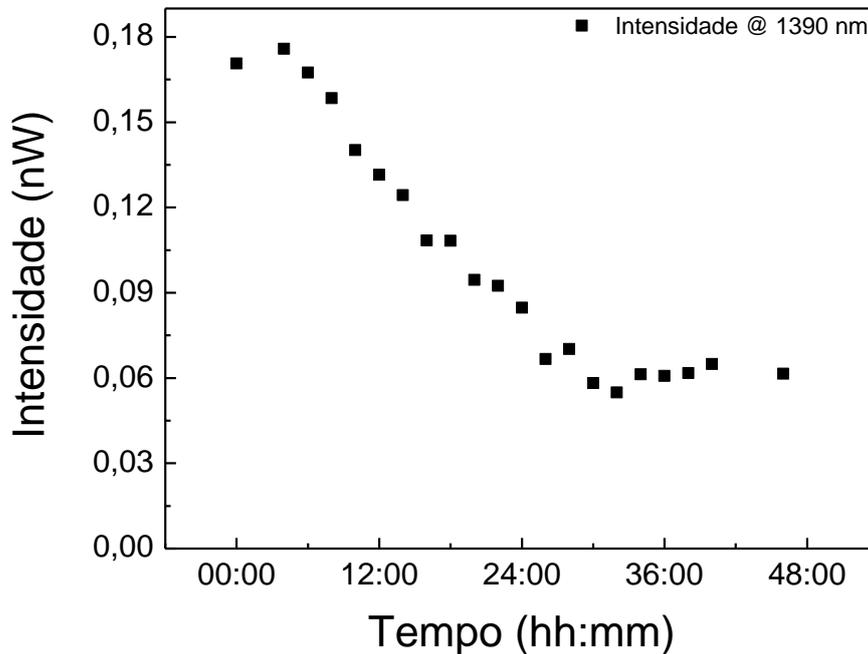


Figura 40 – Gráfico da intensidade (nW) em função do tempo (horas) do comprimento de onda de 1390nm.

As perdas da intensidade ocorreram rapidamente e se estabilizam com aproximadamente 30 horas. O mecanismo que causou as atenuações da intensidade foi associado à alta temperatura, que acelerou a reação química do hidrogênio com o núcleo dopado com germânio, resultando na formação de hidroxilas (OH), fato que comprova as constatações de Williams [] et al., 2000 e Mendez 2008), encontradas na literatura.

5.2.2 Variações na pressão de hidrogênio com temperatura constante de 50°C

Nesta seção foram avaliados os efeitos da difusão do hidrogênio sob as fibras ópticas com pressão de hidrogênio variada e temperatura constante, de acordo com os seguintes experimentos: Experimento – 4, listado pela Tabela 7; Experimento – 6, listado pela Tabela 9; e o Experimento – 8, listado pela Tabela 11.

5.2.2.1 Fibra óptica multimodo do tipo padrão

A Figura 41 apresenta o espectro de atenuação referente à fibra óptica multimodo do tipo padrão (J-FIBER) submetida ao Teste 2 – B e ao Teste 2 – D.

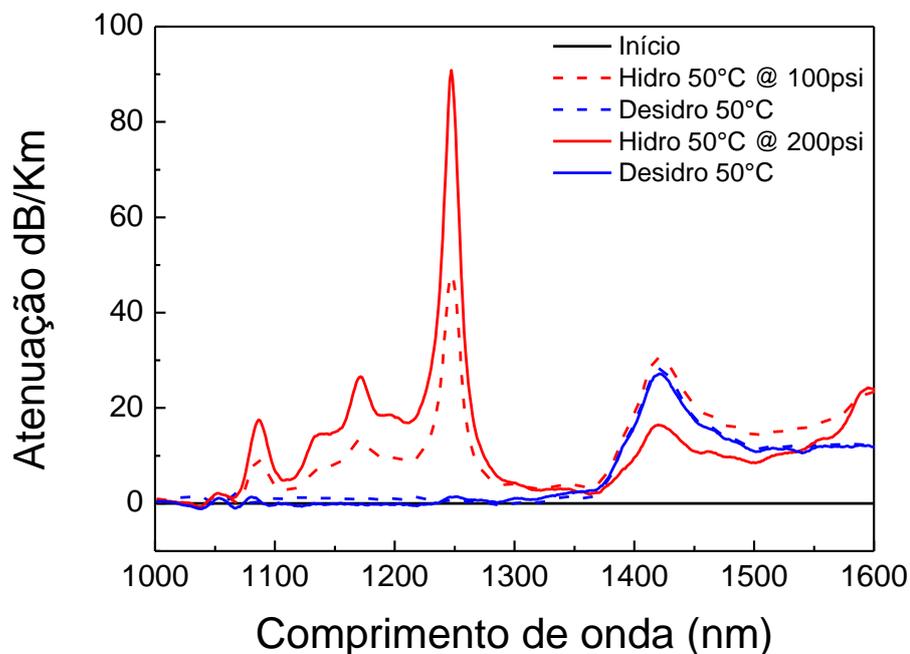


Figura 41 – Espectro da atenuação da fibra J-FIBER em função do comprimento de onda (50°C com pressão variando de 100psi a 200psi), o sistema foi pressurizado apenas no processo de hidrogenação.

Analisando os espectros, nota-se que os efeitos causados pela exposição ao hidrogênio foram muito similares aos efeitos verificados nos testes de pressão constante e temperatura variada, ou seja, o processo de hidrogenação causou danos reversíveis e irreversíveis nas mesmas faixas espectrais (reversíveis até 1300 nm e irreversíveis após 1300 nm). No entanto, ao observarmos o processo de hidrogenação do teste 2 – B e teste 2 – D, verifica-se que o primeiro tom é proporcional à pressão de hidrogênio e a formação de hidroxilas não, pois a mesma apresenta maior atenuação a menores pressões de hidrogênio, como apresentado na Figura 42.

5.2.2.2 Fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura

Para analisar a influência das diversas pressões de hidrogênio sobre a fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura, analisaram-se todos os espectros ópticos obtidos através dos testes do Experimento – 4. Os resultados foram expostos em um único gráfico, com intuito de analisar a atenuação do sinal óptico entre os comprimentos de onda de 1000 nm e 1600 nm, como apresentado pela Figura 42.

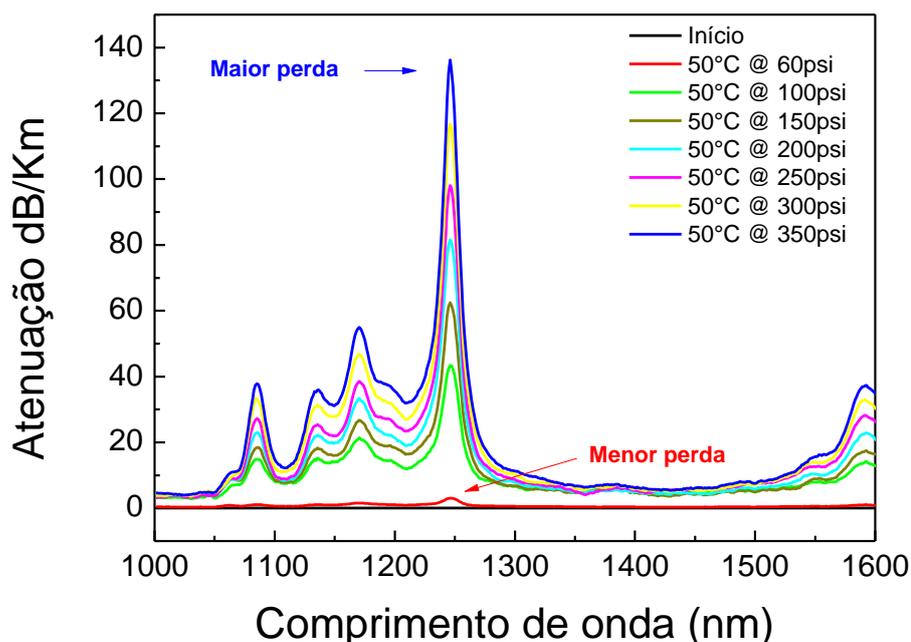


Figura 42 – Espectro da atenuação da fibra com núcleo de sílica pura em função do comprimento de onda (50°C com pressão variando de 60psi a 350psi).

Com relação aos resultados obtidos, deve-se destacar o primeiro tom, região centrada em 1247 nm, onde houve uma atenuação significativa do sinal óptico. Esta atenuação se intensificou à medida que a pressão foi aumentando, o que nos leva a entender que a solubilidade do hidrogênio é diretamente proporcional à pressão, como verificado anteriormente pela de Equação 9.

A temperatura é um parâmetro capaz de acelerar o processo de difusão do hidrogênio. Entretanto nos testes do Experimento – 4 a temperatura foi mantida constante em 50°C, com isso o tempo médio de estabilização dos diferentes testes não sofreram grandes variações mantendo uma média de 96 horas.

Ao final dos testes do Experimento – 4, verificou-se que a intensidade do sinal luminoso, de uma maneira geral, sofreu maior atenuação com o decorrer do aumento da pressão. A Figura 43 demonstra o nível de atenuação

no comprimento de onda de 1247 nm verificado em cada pressão dos testes realizados.

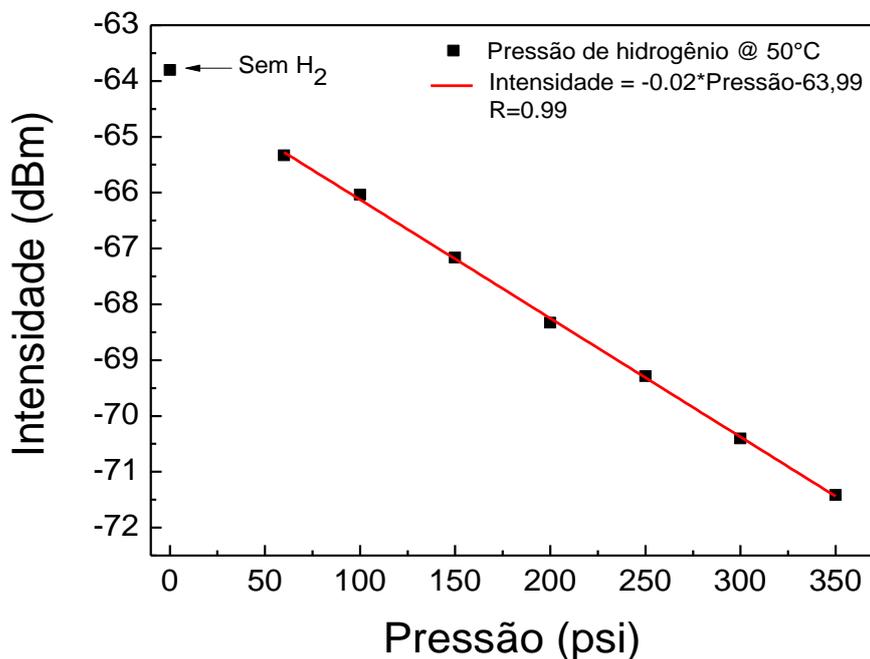


Figura 43 – Gráfico das intensidades em 1247 nm em função da temperatura (50°C com pressão variando de 60psi a 350psi).

Nesta figura pode se observar um relação linear da intensidade (em dBm) em função da pressão de hidrogênio (em psi), com taxa de variação de - 0,02 dBm/psi e coeficiente de correlação da reta igual a 0,99.

5.2.2.3

Fibra óptica monomodo especial em tubo de metal (FIMT)

Como descrito anteriormente, a fibra óptica utilizada por esta montagem é a mesma fibra óptica monomodo especial com núcleo de sílica pura avaliada na seção anterior, porém encontra-se encapsulada em um tubo metálico que oferece uma proteção hermética (FIMT). O foco do Experimento – 6 foi avaliar a hermeticidade deste tubo metálico sob a difusão do hidrogênio.

A Tabela 10 apresenta os testes do Experimento – 6, que utilizou a terceira montagem experimental representada pela Figura 22, com pressão variando de 100psi a 300psi de hidrogênio e temperatura constante de 50°C. A Figura 44 descreve os resultados obtidos por todos os testes do Experimento – 6.

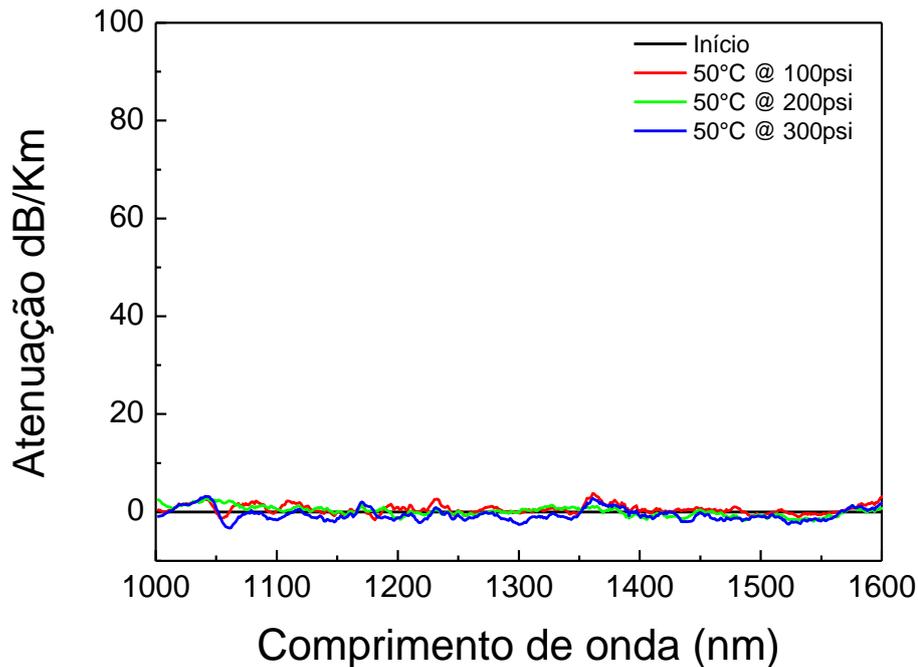


Figura 44 – Espectro de transmissão da FIMT em função do comprimento de onda (50°C com pressão variando 100 a 300psi).

Estes espectros apresentaram dados que como citado anteriormente, possibilitaram confirmar que o tubo metálico bloqueou a difusão do hidrogênio. Pois a mesma não sofreu nenhuma alteração significativa em seu espectro óptico de atenuação, comprovando assim, a eficácia do revestimento hermético ao ser submetido por 45 dias a diferentes pressões de hidrogênio sob temperatura de 50°C.

5.2.2.4

Fibra óptica monomodo especial com revestimento de carbono (Acreo)

Para investigar a influência da pressão de hidrogênio na fibra óptica especial com revestimento de carbono, utilizou-se os testes do Experimento – 8, que fez uso da segunda montagem experimental representada pela Figura 21. Este experimento foi realizado com pressão variando de 100psi a 300psi de hidrogênio e temperatura constante de 50°C, como apresentado pela Figura 45.

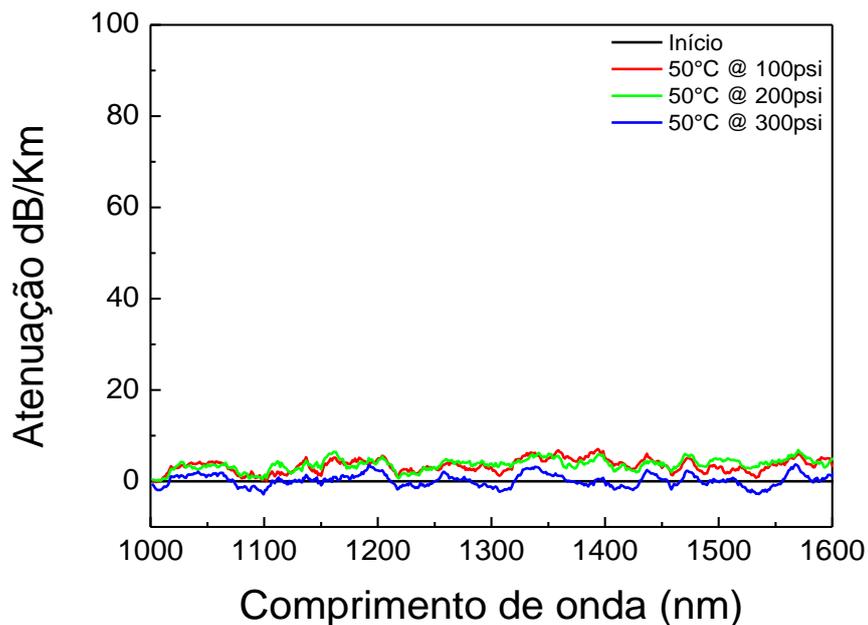


Figura 45 – Espectro de transmissão fibra óptica monomodo especial com revestimento de carbono em função do comprimento de onda (50°C com pressão variando 100 a 300psi).

Com os resultados do Experimento – 8, verificou-se que o espectro óptico de atenuação não variou durante todos os testes, comprovando que o revestimento hermético de carbono blindou a fibra contra a difusão do hidrogênio em diversas pressões, onde cada teste durou aproximadamente duas semanas.

5.3 Avaliação das propriedades mecânicas das fibras ópticas

Com o intuito de determinar como a resistência mecânica das fibras ópticas estudadas são afetadas pela presença de hidrogênio, realizou-se uma bateria de testes de tração mecânica. Vários fatores podem influenciar na resistência mecânica e no valor da tensão de ruptura das fibras ópticas. Estes fatores podem ser caracterizados como intrínsecos e extrínsecos: os fatores intrínsecos podem ser associados aos defeitos contidos no interior da fibra; já os fatores extrínsecos podem ser associados a eventos externos.

As fibras ópticas possuem uma camada de revestimento polimérico que auxilia na proteção da sílica contra as agressões do ambiente. Porém os polímeros estão sujeitos a sofrer alterações nas propriedades físicas, químicas

ou mecânicas de sua estrutura, comprometendo a integridade das partes vítreas da fibra óptica.

A Figura 46 ilustra a fibra óptica J-FIBER com revestimento de acrilato na câmara termo-hiperbárica, antes e após o início dos testes experimentais.



Figura 46 – Figura ilustrativa das fibras ópticas antes e após a bateria de testes.

Como se pode visualizar, a fibra óptica antes da bateria de testes possui uma coloração clara e, após, a coloração da mesma foi alterada. Este efeito foi resultante de um processo de degradação. No entanto, ao se retirar o acrilato da fibra óptica, após os testes, pode-se perceber que não existiu alteração de sua coloração.

5.3.1 Teste de tração mecânica

A Tabela – 12 mostra os resultados da carga de ruptura da fibra óptica J-FIBER e da fibra com núcleo de sílica pura. Para os teste que apresentaram erros extrínsecos os resultados foram desconsiderados (Erro).

Tabela 12– Resultados dos testes de tração de cada corpo de prova.

Teste de tração mecânica das fibras ópticas expostas à temperatura e, ou ao hidrogênio				
AMOSTRAS	J-FIBER SEM H2 (N)	J-FIBER COM H2 (N)	Sílica pura SEM H2 (N)	Sílica pura COM H2 (N)
1^a	39	41,15	Erro	39,08
2^a	50	35	Erro	42
3^a	65	33,4	46,3	48,7
4^a	50	43,3	30	49,5
5^a	48,5	43,1	40,7	42,21
6^a	50,4	40,1	44,5	39
7^a	54,8	46,4	40	Erro
8^a	53,4	39,9	29,2	40,6
9^a	50,4	42,03	50,3	48,4
10^a	Erro	42,47	47,18	36,46
TOTAL	51,27	40,68	41,02	42,88
DESVIO PADRÃO	6,39	3,69	7,30	4,53

Como se pode observar: o primeiro grupo, constituído pela fibra óptica J-FIBER apresentou resultados que permitem perceber que a presença de hidrogênio na fibra óptica resulta em uma carga de ruptura equivalente a 20,65 % menor do que o valor encontrado para o mesmo tipo de fibra óptica, sem a presença de hidrogênio. Como se pode observar, o desvio padrão em alguns casos ficou um pouco acima do satisfatório, que seria de até 5%. No entanto, existem outros fatores que influenciam nestes testes como, por exemplo, o adesivo instantâneo utilizado na fixação, o acrilato, e ou, a poliamida presente nas fibras ópticas. Em alguns casos, o corpo de prova se descascou e correu pelo parafuso, mascarando os resultados. Este resultado é muito sensível à montagem experimental. No entanto, tomou-se o maior cuidado possível para que esses parâmetros não influenciassem tanto, a ponto de prejudicar os resultados.

6 Conclusões

Nesta dissertação de mestrado foram tratados três assuntos: a avaliação do desempenho do sensor distribuído de temperatura (DTS) em função da difusão de hidrogênio na fibra óptica; a caracterização de quatro tipos de fibras ópticas; e a avaliação das propriedades mecânicas das fibras ópticas.

Nos resultados referentes ao DTS, constatou-se que a difusão do hidrogênio compromete a determinação da temperatura, realizada pelo mesmo ao utilizar a fibra óptica multimodo (J-FIBER). A partir destes resultados, observou-se também, que a difusão do hidrogênio na fibra óptica ocorre de forma radial.

A partir da caracterização das fibras ópticas para baixas temperaturas (<70°C), concluiu-se que a fibra óptica multimodo (J-FIBER), dopada com germânio, é muito mais afetada pela difusão de hidrogênio, do que a fibra óptica monomodo com núcleo de sílica pura, e que a fibra óptica monomodo, dopada com germânio, com revestimento de carbono (Acreo).

Os testes referentes à fibra J-FIBER em baixas temperaturas, apresentaram perdas da intensidade em distintos comprimentos de onda, no entanto, o comprimento de onda mais afetado foi o de 1247 nm, assim como a fibra óptica com núcleo de sílica.

Após o processo de desidrogenação, observou-se que a primeira região (1000 nm a 1300 nm) foi reversível, porém a segunda região (1300 nm a 1600 nm) foi irreversível para a fibra óptica multimodo, em virtude da formação de OH. Entretanto, para a fibra com núcleo de sílica pura, ambas as regiões foram reversíveis, devido à ausência de dopantes em seu núcleo.

A literatura cita que testes com temperaturas maiores que 150°C, apresentam uma saturação na segunda região e perdas irreversíveis da intensidade em toda a extensão do espectro óptico para fibras ópticas com núcleo dopado com germânio. Entretanto, no presente trabalho este fenômeno ocorreu à temperatura de 130°C.

Os resultados correspondentes à fibra óptica com revestimento de carbono (Acreo), mostraram-se imunes a difusão de hidrogênio para temperaturas iguais e inferiores a 200°C. Entretanto, para temperatura de 300°C, constatou-se uma acentuada atenuação na segunda região, provando que o revestimento de carbono, não evita a difusão do hidrogênio para esta temperatura.

A fibra óptica monomodo em tubo de metal (FIMT) comprovou ser imune à difusão do hidrogênio em temperaturas de até 300°C com 100psi de pressão de hidrogênio e a temperatura de 50°C com pressões de até 300psi de hidrogênio. A partir destes resultados, verificou-se que a capacidade de operação desta fibra esta dentro dos valores de operação fornecidos pelos fabricantes (450°C).

Com relação a avaliação da influência do hidrogênio nas propriedades mecânicas das fibras ópticas, verificou-se que, a fibra óptica J-FIBER com H₂ apresentou uma carga de ruptura 20% menor, do que o valor encontrado para o mesmo tipo de fibra sem H₂. A fibra com núcleo de sílica pura, não apresentou variações significativas.

De uma forma geral, apenas a fibra óptica monomodo especial em tubo de metal (FIMT) não apresentou atenuações devido à difusão de hidrogênio. Verificou-se também, que as atenuações são dependentes de específicos parâmetros, como pressão de hidrogênio, temperatura, composição estrutural da fibra óptica e o tempo de exposição da mesma.

Referências Bibliográficas

- [1] BORGES, G.S. **Análise e projeto de filtros ópticos**. Master's thesis, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
- [2] WILLIAMS, G. et al. Distributed temperature sensing (DTS) to characterize the performance of producing oil wells. **Industrial Sensing Systems**, v. 4202, p. 39-54, nov. 2000. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/12.411726>>. Acesso em: 24 mar. 2011.
- [3] STIMWATCH, Stimulation Monitoring Service Powered by OptoLog® DTS Technology: banco de dados. Disponível em: <http://www.halliburton.com/public/pe/contents/Case_Histories/web/A_through_R/H09116.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2012.
- [4] STIMWATCH, Stimulation Monitoring Service Powered: banco de dados. Disponível em: <http://www.halliburton.com/public/pe/contents/Data_Sheets/web/H/H09136.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2012.
- [5] SALOMEN, J. J; SPEK, A. V. D. A DTS PRIMER FOR OIL AND GAS PRODUCTION. Banco de dados. Disponível em: <http://spearfish.k12.sd.us/~sgabriel/physics/chap6/DTS_Primer_ISR_M_Paper.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2011.
- [6] MENDEZ, A. **Experimental Investigation on the Hydrogen Effects of Optical Fibers**. 46, p. 2008.
- [7] JACOBS, J. M. The impact of hydrogen on optical fibers. Corning. **Discovering Beyond Imagination**. New York, sep. 2004.
- [8] TECNOLOGIA PETROBRÁS 2011: banco de dados. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/downloads/energy-and-technology/relatorio-tecnologia-petrobras-2011.pdf>> Acesso em: 13 jul. 2012.
- [9] AGRAWAL, G.P. **Fiber- optic Communication System**. 3. ed. Rochester: John Willey & Sons. 2002.
- [10] HECHT.E. **Optics**, 3 ed. New York. Addison-Wesley, 1998.

- [11] MOSZKOWICZ, V. N. **Monitoração de deformações em dutos utilizando sensores a fibra óptica com base em redes de Bragg**. Bol. téc. PETROBRAS, Rio de Janeiro, 45 (2): abr./jun., 2002.
- [12] CONCEITO DE ONDA. Banco de dados. Disponível em: http://www.gta.ufrj.br/grad/01_1/fibrasoticas/fibrasopticas.htm >. Acesso em: 23 jun. 2011.
- [13] FIBRE IN METAL TUBE (FIMT). Banco de dados. Disponível em <http://www.lios-tech.com/Menu/EN.SURE/Products/FIMT>>. Acesso em 06 abr. 2013.
- [14] OPTICAL FIBER COATINGS. Banco de dados. Disponível em <http://www.verrillon.com/products-optical-fiber-coatings.htm>>. Acesso em: 06 abr. 2012.
- [15] CORNING SPECIALTY FIBER PRODUCT INFORMATION SHEETS. Banco de dados. Disponível em: https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:dHRkMUA9ossJ:www.corning.com/WorkArea/downloadasset.aspx%3Fid%3D30931+&hl=pt-BR&gl=br&pid=bl&srcid=ADGEEESiVyp5KGY_HavPtdKWRjGUJhhePYL5RJbFX80RsoQYdWHuN7yqqV3IV2xhMViRu0Z_rghfH_n4vIkwZA2QnSDqVBWYhgodsS2aN405eFjLRynt0preo4xxELcL_T9SbFifZrmAJ&sig=AHIEtbQ1RZN1IG2eGkvfWn-xDxi7Aa4dig>. Acesso em: 23 fev. 2013.
- [16] ACREO – INNOVATION FOR GROW. Banco de dados. Disponível em: <https://www.acreo.se/>>. Acesso em 09 mar. 2013.
- [17] S.HE, G.; H.LIU., S. Physics of nonlinear optics. **Word Scientific**. Singapore, 2000.
- [18] CULSHAW, B. Optical Fiber Sensor Technologies: Opportunities and - Perhaps – Pitfalls, **J. Lightwave Technology**, v. 22, n. 1, p. 39-50, 2004. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1266676&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1266676>. Acesso em> 05 nov. 2011.

- [19] GIESEN, N. et al. Double-ended calibration of fiber-optic raman spectra distributed temperature sensing data. **Sensors**, v. 12, n. 5, p. 5471-5485, abr. 2012.
- [20] MENDEZ, A. **Overview of Fiber Optic Distributed Sensing Techniques and Their Application for Oil & Gas Pipeline Leak Detection**. 176, p. 2008.
- [21] RIBEIRO, L. A. **Espalhamento raman em fibras ópticas com aplicação em sensores distribuídos de temperatura**. Tese de doutorado. INPE. São José dos Campos. 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BCGNC8>>. Acesso em: 07 ago. 2011.
- [22] FIBRE OPTIC SENSORS AND MONITORING SYSTEMS. Banco de dados. Disponível em: <<http://www.sensornet.co.uk/>>. Acesso em 07 fev. 2013.
- [23] MENDEZ, A.; DALZIEL, R.; DOUGLAS, N. Applications of Optical Fiber Sensors in Subsea and Downhole Oil Well Environments. In: HARSH ENVIRONMENT SENSORS II. 16, 1999. Boston. **Anais...** Boston: 1999. P.16-28. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1117/12.372836>>. Acesso em: 09 abr. 2012
- [24] PHOTONICS APPLIED: OPTICAL SENSING: Downhole sensing puts fiber optics to the test. Banco de dados. Disponível em: <<http://www.laserfocusworld.com/articles/2011/04/photronics-applied-optical-sensing-downhole-sensing-puts-fiber-optics-to-the-test.html>>. Acesso em 27 set. 2011.
- [25] MCKAY,G.; BIXENMAN, P. W.; G. WATSON, G. Advanced Sand Control Completion With Permanent Monitoring. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION. 2000, Dallas. **Anais...** Dallas: SPE, 2000. P. 1-4. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=00062954>>. Acesso em 21 ago, 2012.
- [26] FOCUS TEMPERATURE LOGGING DTS. Banco de dados. Disponível em: <<http://www.aip.com.co/en/ourservices/focus-optical>>. Acesso em: 08 mar.2013.
- [27] IINO,A. et al. Mechanisms of hydrogen-induced losses in silica-based optical fibers. **Journal of LightwaveTechnology**, v. 8, n. 11, nov. 1990. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=60564&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel1%2F50%2F2204%2F00060564.pdf%3Farnumber%3D60564>>. Acesso em: 04 mai. 2011.

- [28] STONE, J. Interactions of hydrogen and deuterium with silica optical fibers: A review. **Journal of Lightwave Technology**, v. LT-5, n. 5. p. 712-733 may,1987.
- [29] MOCHIZUKI, K.et al. Influence of hydrogen on optical fiber loss in submarine cables. **Journal of Lightwave Technology** . v. 12, n. 6, p. 802-807. dec. 1984.
- [30] ABBADE A. L. R.; CAPUTO, M. R. C. Aplicação de OTDR na análise de problemas de stenuação em fibras ópticas: Estudo de casos. **Revista Científica Periódica: Telecomunicações**, v. 5, n. 2, p. 25-33, dec. 2002.
- [31] ANALIZADOR OPTICO DE ESPECTRO. Banco de dados. Disponível em: <Fonte <http://www.gsamart.com/webdata/prodimg/ANRI_MS9710C_lg.jpg>. Acesso em 08 mar. 2013.
- [32] BASS, M.; STRYLAND, E. W. V. Fiber optics handbook: **Optical society of America**. 2002.
- [33] BIAO, L. O.; BELANGER, D. Flow profiling vis distributed temperature sensor (DTS) system expectation and reality. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION. 2004, Texas. **Anais...** Texas: SPE, 2004. P. 26-29. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=00090541>>. Acesso em 21 ago. 20012.
- [34] BIRNBAUM, H. K. Mechanisms of hydrogen related fracture of metals. **Technical Report**, may. 1989.
- [35] CARBON COATED SINGLEMODE FIBER WITH POLYIMIDE. Disponível em: <<http://www.fibertronix.com/carbon-coated-singlemode-fiber-polyimide>>. Acesso em: 09 mar. 2013.
- [36] CHAFFEE, C. D. Building the Global Fiber Optics Superhighway. P. 135. 2002.
- [37] CHEN, T. et al. Distributed hydrogen sensing using in-fiber Rayleigh scattering. **AIP**, v. 100, n. 19, p. 191105, mai. 2011. Disponível em:

- <http://apl.aip.org/resource/1/applab/v100/i19/p191105_s1?isAuthorized=no>. Acesso em 25 set. 2012.
- [38] CLOWES, J.R. et al. Effects of high temperature and pressure on silica optical fiber sensors. **IEEE**, v.10, p. 403-405, mar. 1998.
- [39] COVIELLO, G. et al. Thermally stabilized PCF-based sensor for temperature measurements up to 1000°C. **Optical Society of America**, v. 17, n.24, p.21551-21559, 2009.
- [40] ESTUFA. Banco de dados. Disponível em: <http://www.labstore.com.br/produtos_det.php?id_produto=141>. Acesso em 08 mar. 2013.
- [41] FAVERO, F.C. et al. Hydrostatic pressure sensing with high birefringence photonic crystal fibers. **Academic Journal**, v. 10, n. 11, p. 9698-9711, nov. 2010. Acesso em: 17/03/2012 (www.mdpi.com/journal/sensors).
- [42] FIBRAS ÓPTICAS. Banco de dados. Disponível em <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0014235_04_cap_02.pdf>. Acesso em 06 abr. 2013.
- [43] FIBRAS ÓPTICA: RESUMO. Banco de dados. Disponível em <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/fibra-optica/fibra-optica-resumo.php>>. Acesso em 06 abr. 2013.
- [44] FRAZÃO, O.; BAPTISTA, J. M.; SANTOS, J. L. Recent advances in high-birefringence fiber loop mirror sensors. **Sensors**, v. 7, n. 11, p. 2970-2983, nov. 2007. Acesso em 17/03/2012 (www.mdpi.org/sensors).
- [45] FRINGS, J.; WALK, T. Pipeline leak detection using distributed fiber optic sensing. **Pipeline inspection and control**. p. 57-61. 2010.
- [46] FOCUS TEMPERATURE LOGGING DTS. Banco de dados. Disponível em: <<http://www.aip.com.co/en/ourservices/focus-optical>>. Acesso em: 08 mar.2013.
- [47] GYSLING, D. L. Changing Paradigms in Oil and Gas Reservoir Monitoring. In: OPTICAL FIBER SENSORS CONFERENCE TECHNICAL DIGEST, 15. 2002.

- Anais...** 2006, IEEE. v. 1, P. 43-46. 2002. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=1000498>> Acesso em 12 dez. 2011.
- [48] HADJIFOTIOU, A. Telecommunications and Optical Fibres. **MSc on Photonics and Optoelectronic Devices**. 2006.
- [49] HAN, Y. et al. Temperature and strain discrimination based on a temperature-insensitive birefringent interferometer incorporating an erbium-doped fiber. **Optical Society of America**, v. 48, n. 12, p. 2303-2307, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.48.002303>>. Acesso em: 10 jun. 2011.
- [50] HUBERT, T. et al. Hydrogen sensors: A review. **Sensors and Actuators**. p. 329-352. 2011.
- [51] INAUDI, D.; GLISIC, B. Fiber Optic Sensing for Innovative Oil & Gas Production and Transport Systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBER SENSORS. 2006, Cancun. **Anais...** Cancun: 2006. P. 1-4. Disponível em: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?uri=OFS-2006-FB3>>. Acesso em: 05 set. 2011
- [52] JEONG, T. H. Basic Principles and Applications of Holography. **Fundamentals of photonics**. p. 211-248. 1999.
- [53] KALAR, K. SensorTran Highlights Distributed Temperature Sensing for Oil & Gas Applications at Photonic Sensors Workshop: banco de dados. Disponível em: <http://www.sensortran.com/news/OIDAMediaAlert.pdf>> Acesso em: 13 jul. 2012.
- [54] KAURA, J.; SIERRA, J. Successful Field Application in Continuous DTS Monitoring Under Harsh Environment of SAGD Wells Using Improvised Optical-Fiber Technology. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION. 2008, Colorado. **Anais...** Colorado: SPE, 2008. P. 1-9. Disponível em: <http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=SPE-116149-MS>>. Acesso em 21 ago. 20012.
- [55] KERSEY, A. D. Optical fiber sensors for permanent downwell monitoring applications in the oil and gas industry. **Ieice Trans, Electron**. v. E83-C, n. 3. mar. 2000.

- [56] KLUTH, R.; NALDRETT, G. Fiber-Optic DTS Flow Profiling Installed in Advanced MRC Well. p,30-32 . 2009.
- [57] KRAGAS, T. et al. The optica oil fiel: Deployment and application of permanent in-well fiber optic sesing systems for production and reservoir monitoring. In: ANNUL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION. 2001. Orleans. **Anais...** Orleans: SPE, 2001. P. 1-9. Disponivel em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=00071529>>. Acesso em: 21 ago. 2012.
- [58] LANIER, G. H. Brunei field trial a fiber optic distributed temperature sensor (DTS) system in a 1,000m open hole horizontal oil produced. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION. 2003, Colorado. **Anais...** Colorado: SPE, 2003. P. 5-8. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=00084324>>. Acesso em 21 ago, 2012.
- [59] LEMAIRE, P. J. **Reliability of optical fibers exposed to hydrogen**: Prediction of longterm loss increases. Optical Engineering, v. 30, n.6, p. 780-781. 1991.
- [60] MAIDA, J. Hydrogen diffusion delay barrier for fiber optic cables used in hostile environment. **United states patent**, jun. 2004. Disponível em: <<https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20121017/patents/EP2511746NWA1/document.pdf>>. Acesso em 04 abr 2011.
- [61] MASSA, N. Fiber Optic Telecommunication. **Fundamentals of photonics**. p. 211-248. 1999.
- [62] MENEGOTO, G. F. **Tratamento termoquímico de hidrogenação em fibras ópticas**. Dissertação de mestrado. UTFPR, 2006.
- [63] OPTICAL FIBRE CABLE. Banco de dados. Disponível em: <[http://books.google.com.br/books?id=Oj7CWNPDLoC&pg=PA327&lpg=PA327&dq=1.%09J.+Stone,+Interactions+of+hydrogen+and+deuterium+with+silica+optical+fiber:+A+review.+J.+Lightwave+Technol.,+LT-5,+712-733+\(1978\)&source=bl&ots=Eawb9ffC4h&sig=SAJ_yP3KYcY-LH4J5BqCEFD8zY0&hl=pt-BR&sa=X&ei=JziYT8mpBuif6AGNhIXpBg&ved=0CCIQ6AEwAA#v=onepage&q=1.%09J.%20Stone%2C%20Interactions%20of%20hydrogen%20and%20deuteriu](http://books.google.com.br/books?id=Oj7CWNPDLoC&pg=PA327&lpg=PA327&dq=1.%09J.+Stone,+Interactions+of+hydrogen+and+deuterium+with+silica+optical+fiber:+A+review.+J.+Lightwave+Technol.,+LT-5,+712-733+(1978)&source=bl&ots=Eawb9ffC4h&sig=SAJ_yP3KYcY-LH4J5BqCEFD8zY0&hl=pt-BR&sa=X&ei=JziYT8mpBuif6AGNhIXpBg&ved=0CCIQ6AEwAA#v=onepage&q=1.%09J.%20Stone%2C%20Interactions%20of%20hydrogen%20and%20deuteriu)>

[m%20with%20silica%20optical%20fiber%3A%20A%20review.%20J.%20Lightwave%20Technol.%2C%20LT-5%2C%20712-733%20\(1978\)&f=false](#)>. Acesso em: 17 set. 2012.

- [64] OUYANG, L.; BELANGER, D. Flow profiling by distributed temperature sensor (DTS) system – expectation and reality. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION. 2006. Texas. **Anais...** Texas: SPE, 2006. P. 269-281. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=00090541>>. Acesso em: 12 dez. 2011.
- [65] OVIELLO, G. et al. Thermally stabilized PCF-based sensor for temperature measurements up to 1000°C. **Optical Society of America**, v. 17, n. 24, p. 21551-21559, 2009. Disponível em: <http://icfo-vs01.upc.es/images/publications/J09-120.pdf>. Acesso em 12 dez. 2011.
- [66] PECK, D.; SEEBACHER, P. Distributed Temperature Sensing using Fibre-Optics (DTS Systems). In: ELECTRICITY ENGINEERS' ASSOCIATION ANNUAL CONFERENCE. 2000. New Zealand. **Anais...**New Zealand: 2000. P. 1-8.
- [67] PEDROTTI, L.S. Basic geometrical optics. **Fundamentals of photonics**. p. 73-168. 1999.
- [68] POLADIAN, L.; LADOUCEUR, F.; MILLER P.D.. Effects of surface roughness on gratings. **J. Optical Society America**, v. 14, n. 6, p. 1339-1344, 1997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.14.001339>>. Acesso em 10 jun 2011.
- [69] QIAN, W. et al. Intensity measurement based temperature-independent strain sensor using a highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror. **Optics communications**. p. 5250-5254. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401810008163>>. Acesso em: 22 jun. 2011
- [70] READY, J. Optical Detectors and Human Vision. **Fundamentals of photonics**. p. 211-248. 1999.
- [71] RIBEIRO, J. A. J. R. Características da Propagação em Fibras Ópticas, **Revista Telecomunicações**, v. 02, 01, 1999. Disponível em <<http://www.inatel.br/>

[revista/index.php?Itemid=100003&option=com_docman](#)>. Acessado em: 03 jul. 2012.

- [72] ROCHA, F. R. P.; TEIXEIRA, L. S. G. Estratégias para aumento de sensibilidade em espectrofotometria UV-VIS. *Química nova*, v. 27, n. 5, p. 807-812, 2004. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422004000500021>. Acesso em: 23 fev. 2013.
- [73] ROCHA. R. P. de O. **Instrumentação geotécnica com fibra ótica:** monitoramento de frente de umedecimento e análise da variação do grau de saturação em solos arenosos. Dissertação de Mestrado, UFP, Curitiba, 2011.
- [74] RUSSELL, P. St J., ARCHAMBAULT, J.L. e REEKIE, L. *Phys. World*, v. 41, 1993.
- [75] SANDERS, P. E.; MACDOUGALL, T. W. Recent developments in fiber optic sensor technology for high temperature well monitoring. **Proceeding Geothermal Resource Council Annual Meeting**. Reno. 2009. Disponível em: <<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-47/issue-4.html>>. Acesso em: 06/08/2011.
- [76] _____; et al. Field evaluation of dual-ended, high temperature, hydrogen tolerant. Fiber optic DTS sensor with compact fiber loop assembly. **WHOC**. 2011.
- [77] SEEBER, F. Light Sources and Laser Safety. **Fundamentals of photonics**. p. 39- 72. 1999.
- [78] SEMJONOV, S. et al. Hermetically coated specialty optical fibers. In: WORKSHOP ON SPECIALTY OPTICAL FIBERS AND THEIR APPLICATIONS. 2010. Mexico. Anais... Mexico: 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/12.867097>>. Acesso em: 04 abr. 2012.
- [79] SHARMA, H. et al. A Successful Application of Permanently Installed Distributed Temperature Sensing (DTS) for Optimization of Acid Treatment in Power Water Injector with Advanced Well Completion: Case Study. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION. 2010 Italy. **Anais...** Italy: SPE, 2010. P.19-22. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=SPE-132746-MS>>. Acesso em: 22 jun. 2011.

- [80] SIGEL, G. H. Optical Absorption of Glasses. Academic Press, v. 12, p. 5-12. 1977.
- [81] SILFVAST, W. T. Lasers. **Fundamentals of Photonics**. p. 1-44. 1999.
- [82] SILVA, J.C. C. **Monitoração de vibrações de estruturas com o emprego de sensores em fibra ótica**. Tese de Doutorado, CEFET-PR, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, p. 37, 2004.
- [83] SKINNER, N. G; MAIDA, J.L. Downhole Fiber-optic Sensing: The Oilfield Service Provider's Perspective. **SPIE**. v. 5589, p. 206-220, Bellingham, 2004. Disponível em: <http://spie.org/x648.html?product_id=571413>. Acesso em: 19 set. 2011.
- [84] SLAMAN M. et al. Optimization of Mg-based fiber optic hydrogen detectors by alloying the catalyst. **International Journal of Hydrogen energy**, v.33, p.1084-1089, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.09.036>>. Acesso em: 04 abr. 2012.
- [85] SWART, P. L. et al. Study of the pressure dependence of hydrogen diffusion in optical fiber by an interferometric technique. **Optics Communications**, v. 217, n. 1, p. 189-196, mar. 2003.
- [86] TECNOLOGIA PETROBRÁS 2011: banco de dados. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/downloads/energy-and-technology/relatorio-tecnologia-petrobras-2011.pdf>> Acesso em: 13 jul. 2012.
- [87] TEST AND MEASUREMENT. Banco de dados. Disponível em: < Fonte http://www.gsamart.com/webdata/prodimg/ANRI_MS9710C_lg.jpg>. Acesso em 08 mar. 2013.
- [88] TEST AND MEASUREMENT. Banco de dados. Disponível em: <http://tmi.yokogawa.com/discontinued-products/optical-measuring-instruments/aq4305-white-light-source>>. Acesso em 08 mar. 2013
- [89] TRASFERETTI, B. C.; DAVANZO, C. U. Introdução às técnicas de reflexão espetacular e reflexão-absorção no infravermelho: **Reflexão especular**, v. 24, n.1, p.94-98, 2001.

- [90] TRIGT, C. Visual system-response functions and estimating reflectance. **Optical Society America**, v. 14, n. 4, p.741-755, 1997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.14.000741>>. Acesso em: 13 abr. 2012.
- [91] TOBIN, M.; BURKE, R.; LABRUJERE, J. Fibre optics for pipeline monitoring. In: GTS-2005 Conference. 2005. Moscow. Anais... Moscow: 2005.
- [92] VANDERGRIFF, L. J. et al. Nature and Properties of Light. **Fundamentals of photonics**. p.1-38. 1999. Disponível em: <<http://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2001.pdf>>. Acesso em 05 mai. 2012.
- [93] VASIL'EV, S.A. et al. Enhanced diffusion of molecular hydrogen in germanosilicate fibres loaded with hydrogen at high pressures. **Quantum Electronics**, v. 35, n. 3, p. 278-284, 2005.
- [94] VILLATORO, J.; FINAZZI, V. Temperature-insensitive photonic crystal fiber interferometer for absolute strain sensing. **Applied Physics Letters**. aug. 2007.
- [95] XU, J. **High temperature high bandwidth fiber optic pressure sensors**. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2005.
- [96] YAMAUCHI, Y. et al. A study of the stability, reliability, and Accuracy of neubrescope-based pipe thinning Detection system. In: International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. 2007. Canada. **Anais...** Canada: SPE, 2007. P.13-16. Disponível em: <http://www.neubrex.com/pdf/a_study_of_the_stability_reliability_and_accuracy_of_neubrescope-based_pipe_thinning_detection_system.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2011.
- [97] YAN, X. et al. Raman transient response and enhanced soliton self-frequency shift in ZBLAN fiber. **J. Opt. Soc. Am. B**, v. 29, n. 2, p. 238-243, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.29.000238>>. Acesso em: 05 mai. 2012.
- [98] WANG, C. et al. High-performance hermetic optical fiber of downhole applications. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION. 2004, **Anais...**Texas, SPE, 2004. P. 26-29.

- [99] WEI, F.; TSUZAKI, K. Response of hydrogen trapping capability to microstructural change in tempered Fe-0.2C martensite. *Scripta Materialia*, v. 52, n.6, p.467-472, mar. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646204006475>>. Acesso em: 15 ago 2011.
- [100] WOLF, H.F., ed., **Handbook of Fiber Optics: Theory and applications**, Garland STPM Press,1979.
- [101] WRIGHT, P. W. The future of fiber optics in the offshore oil industry. **Offshore magazine**, p. 1-8. may. 2000. Disponível em: <https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:l0um1vchJwJ:www.odi.com/ODI_Documents/Articles_and_Papers/word_doc/Future%2520of%2520Fiber%2520Optics.doc+&hl=pt&pid=bl&srcid=ADGEESh0NBRIkmXZzdKw4hxcoVp4UqWWczLv t5O2rjybQ0sG4zzcCrS6joLClyPurVkGHR3vWEDmownRuqIm9rVJRZDtYtR99YFqGBrM8Bau6ikWXAoIpDBapP-TgkLgkoSAvyHITSV&sig=AHIEtbS52-T1EPthq01ZUNj-BPiSUA5FEq>. Acesso em: 09 abr. 2012.
- [102] ZHANG, H. et al. Temperature-insensitive displacement sensor based on high-birefringence photonic crystal fiber loop mirror. **Optica Applicata**, v. XL, n. 1, p. 209-217, 2010. Disponível em: <http://www.if.pwr.wroc.pl/~optappl/pdf/2010/no1/optappl_4001p209.pdf>. Acesso em: 13 set. 2011.
- [103] ZU, P. et al. Fabrication of a temperature-insensitive transverse mechanical load sensor by using a photonic crystal fiber-based Sagnac loop. **Measurement science and technology**, v. 22, p.1-4, 2011. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/0957-0233/22/2/025204>>. Acesso em: 13 set. 2011.