

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Bernardo Pfeiffer Louro**

**Medição de deformação em rochas Bege Bahia  
durante a perfuração a laser**

**Projeto de Graduação**

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

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga  
Coorientadora: Dra. Sully Milena Mejia Quintero

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família pelo incentivo e esforço.

Agradeço a minha namorada pelo suporte e paciência comigo durante todo esse tempo.

Agradeço ao meu orientador Arthur Braga e à coorientadora Sully pela constante ajuda e paciência para elaboração desse trabalho.

Agradeço ao pesquisador Dario Prada por ter cedido algumas das figuras e dados usados neste trabalho.

Agradeço à PUC-Rio e ao laboratório LSFO pelo apoio concedido no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

Louro, Bernardo Pfeiffer; Braga; Arthur Martins Barbosa (orientador); Quintero, Sully Milena Mejia (coorientadora). **Medição de deformação em rochas Bege Bahia durante a perfuração a laser**. Rio de Janeiro, 2018. 40p. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com o avanço constante da tecnologia, pensa-se na viabilidade da utilização de laser de alta potência como ferramenta alternativa para a técnica de canhoneio no interior do poço de petróleo, onde as condições existentes são tais que há uma enorme pressão de confinamento nas rochas. O canhoneio consiste em uma técnica, que a partir de disparos de cargas explosivas de alta energia, são realizadas perfurações para que assim haja a comunicação entre o interior do reservatório de petróleo e o poço. Dessa forma, abre-se um percurso, uma porta de entrada, para que o petróleo transite para o interior do poço e seja levado até a unidade de produção no exterior na plataforma em alto mar. O funcionamento ocorre através de um suporte vertical onde são instaladas cargas explosivas, que por sua vez são introduzidas até o local onde se deseja fazer a comunicação, no fundo no poço, até que sejam acionadas. Dessa forma, com as perfurações já concluídas, os fluidos contidos no reservatório irão migrar para o poço para que depois seja levado até a unidade onde os líquidos serão processados para a obtenção de petróleo. Os estudos de deformação induzida em rochas durante a perfuração a laser contribuirão para novos estudos podendo dizer se ela é uma ferramenta auxiliar para a de canhoneio ou simplesmente não é uma solução viável. O objetivo geral desse projeto será determinar a deformação induzida em rochas carbonáticas Bege Bahia durante a perfuração a laser usando sensores ópticos. Paralelamente serão comparadas a morfologia de sua perfuração com as de rochas arenito. Dessa forma, os objetivos específicos serão, estudar a distribuição do estado de tensão nas rochas Bege Bahia sob pressão controlada de confinamento, com o intuito de simular a pressão existente nos poços de petróleo, e à pressão atmosférica. Adicionalmente serão analisadas as morfologias da perfuração da Bege Bahia com arenito assim como os subprodutos decorrentes da ação do laser.

## Palavras-chave

Perfuração e canhoneio a laser, redes de Bragg em fibras ópticas, sensores a fibra óptica, lasers de alta potência

## ABSTRACT

Louro, Bernardo Pfeiffer; Braga; Arthur Martins Barbosa (advisor); Quintero, Sully Milena Mejia (co-advisor). **Strain measurement in Beige Bahia rocks during laser drilling**. Rio de Janeiro, 2018. 40p. Graduation Project – Department of Mechanical Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

With the constant advancement of technology, the viability of the use of high-power laser as an alternative tool for the perforation technique inside the oil well is considered, where the existing conditions are such that there is enormous pressure of confinement in the rocks. Perforation consists of a technique, that from firings of explosive loads of high energy, perforations are realized so that there is communication between the interior of the oil reservoir and the well. In this way, a path opens, an entrance door, so that the oil transits into the well and is taken to the production unit. The operation takes place through a vertical support where explosive charges are installed, which in turn are introduced to the place where communication is desired, in the bottom of the well, until they are activated. In this way, with the drillings already completed, the fluids contained in the reservoir will migrate to the well and then be taken to the unit where the liquids will be processed to obtain oil. Studies of rock-induced deformation during laser drilling will contribute to further studies and may indicate if it is an auxiliary tool for perforation or is simply not a viable solution. The overall objective of this project will be to determine the induced strain in Beige Bahia carbonate rocks during laser drilling using optical sensors. In parallel, the morphology of its drilling will be compared with those of sandstone rocks. Thus, the specific objectives will be to study the stress distribution in the Beige Bahia samples under controlled confinement pressure, in order to simulate the pressure in the oil wells and at atmospheric pressure. In addition, the morphologies of the Beige Bahia drilling with those of sandstone will be analyzed as well as the byproducts resulting from the laser action.

## Keywords

Laser drilling and perforation; fiber Bragg gratings; fiber optical sensors; high-power lasers.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Motivação	11
1.2. Objetivos	11
1.3. Estrutura do trabalho	11
2. CONCEITOS BÁSICOS	13
2.1. Laser	13
2.1.1. Laser de fibra	13
2.1.2. Laser de alta potência YLS 1500 - TR IPG Photonics	14
2.2. Fibra óptica	16
2.3. Sensores a fibra óptica	18
2.4. Sensores a rede de Bragg: FBG (Fiber Bragg Grating)	19
3. METODOLOGIA	22
3.1. Caracterização das rochas	22
3.1.1. Instrumentação dos sensores na rocha	23
3.2. Metodologia dos testes	24
3.3. Condições de contorno	26
3.4. Considerações mecânicas	28
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	30
4.1. Calibração dos sensores	30
4.2. Medidas térmicas	32
4.3. Tensão medida durante a perfuração a laser	34
4.4. Análise de raio-X scan da perfuração a laser	37
4.5. Tensão residual após a perfuração a laser	38
5. Conclusão	41
6. Referências	42

## Lista de Figuras

Figura 1. Diferenças entre os dois tipos de amostras rochosas, Bege Bahia e Botucatu, respectivamente, após a perfuração a laser [cedido por Dario P. Prada].....	10
Figura 2: Distribuição esquemática de um dispositivo laser .....	13
Figura 3: Desenho esquemático do laser a fibra.....	14
Figura 4: Foto da bancada experimental utilizada para realizar a perfuração .....	15
Figura 5: Representação da fibra óptica. ....	16
Figura 6: Raios de luz se propagando dentro de uma fibra óptica com reflexão total. ...	17
Figura 7: Fibra óptica multimodo de salto de índice.....	18
Figura 8: Fibra óptica multimodo de gradiente de índice .....	18
Figura 9: Fibra óptica monomodo .....	18
Figura 10: Desenho esquemático do funcionamento espectral de um sensor FBG .....	20
Figura 11: Distribuição dos sensores FBG [cedido por Dario P. Prada]. ....	23
Figura 12: Interrogador óptico Micron Optics SM 125.....	23
Figura 13: Curva de potência do laser [cedido por Dario P. Prada].....	24
Figura 14: a) Vaso de pressão desmontado. b) Vaso de pressão com a amostra rochosa inserida pela membrana de silicone [cedido por Dario P. Prada]. ....	25
Figura 15: Bomba hidráulica Enerpac. ....	26
Figura 16: Diagrama esquemático das condições de contorno do experimento de perfuração a laser. ....	27
Figura 17: Bancada experimental final [cedido por Dario P. Prada]. ....	28
Figura 18: Amostra rochosa de Bege Bahia utilizada para a calibração.....	30
Figura 19: Curva de calibração dos sensores obtidos pelo interrogador óptico. ....	31
Figura 20: Curva $\Delta\lambda T / \Delta^\circ\text{C}$ para estimar a sensibilidade dos sensores .....	31
Figura 21: Monitoramento térmico da amostra pós-perfuração .....	32
Figura 22: Fotografia da amostra rochosa 5 segundos após ao desligamento do laser.	33
Figura 23: Fotografias térmicas sequenciais da superfície da amostra após a perfuração a laser [cedido por Dario P. Prada]. ....	34
Figura 24: Distribuição de tensão com pressão de confinamento com 10 minutos de perfuração a laser .....	35
Figura 25: Distribuição de tensão sem pressão de confinamento com 10 minutos de perfuração a laser .....	35

Figura 26: Imagens de raio-X da perfuração da amostra não pressurizada em 10 segundos de ação do laser [cedido por Dario P. Prada].....	37
Figura 27: Imagens de raio-X da perfuração da amostra pressurizada em 10 segundos de ação do laser [cedido por Dario P. Prada]. .....	37
Figura 28: Imagens de raio-X das seções transversais da amostra não pressurizada em 10 segundos de ação do laser [cedido por Dario P. Prada].....	38
Figura 29: Imagens de raio-X das seções transversais da amostra pressurizada em 10 segundos de ação do laser [cedido por Dario P. Prada].....	38
Figura 30: Amostra evidenciando trincas causadas pela irradiação de 30 segundos de laser .....	39
Figura 31: a) Amostra rochosa logo após a perfuração a laser de 30 segundos. b) Amostra rochosa após alguns dias em repouso, depois da perfuração a laser de 30 segundos [cedido por Dario P. Prada].....	40
Figura 32: Evidência da delaminação na amostra rochosa [cedido por Dario P. Prada]. .....	40



## Lista de Tabelas

Tabela 1: Dados técnicos do laser YLS 1500 TR.....	15
Tabela 2: Caracterização do Bege Bahia [cedido por Dario P. Prada]. ....	22
Tabela 3: Propriedades de performance do Micron Optics SM 125 [cedido por Dario P. Prada].....	24
Tabela 4: Especificações bomba hidráulica Enerpac.....	26

# 1. INTRODUÇÃO

Embora a ideia de usar laser de alta potência como ferramenta de perfuração na indústria de petróleo e gás parecesse um sonho há 50 anos atrás, hoje em dia não é improvável.

Para realizar a comunicação entre o poço e o interior do reservatório, a técnica mais comum que existe hoje é a de canhoneio. Tal técnica consiste na utilização de disparos de cargas explosivas de alta energia para abrir um percurso para que o petróleo em si escoe até o poço e seja levado para tratamento externo. Porém, estuda-se técnicas alternativa auxiliares que possam vir a facilitar e ajudar a realização dessa comunicação, como a de perfuração a laser no lugar de utilização de explosivos, tornando assim o lugar da perfuração um ambiente mais controlado, seguro e eficiente.

Hoje, é possível encontrar lasers de fibra de alta potência disponíveis comercialmente com potência de saída de até 100 kW e vários esforços acadêmicos para tornar a ideia em realidade [1]. Além disso, há inúmeros estudos sobre perfurações a laser aplicadas de forma híbrida, em conjunto com a broca convencional. Ou seja, primeiro se enfraquece a rocha com a atuação do laser e em seguida com a broca é feita a remoção da camada de rocha que já está fraturada, assim tornando muito fácil a perfuração, diminuindo a necessidade energética da broca convencional e até aumentando sua vida útil.

É evidente que há muitos desafios a serem superados, mas também está claro que resultados importantes foram alcançados neste campo, a ponto de existirem empresas que comercializam a aplicação de lasers de alta potência para as indústrias de petróleo, gás e mineração. [2]

A Figura 1 exemplifica, respectivamente e qualitativamente o quão diferente é a morfologia da perfuração e danos em rochas de arenito e carbonáticas perfuradas com as mesmas condições operacionais [3]. Na rocha de Botucatu, que é arenito, observam-se pequenas fraturas, e em torno da perfuração uma grande formação de efeito de vitrificação (vidro derretido). Enquanto no caso da rocha carbonática, comumente conhecida como Bege Bahia, as fraturas ainda não apareceram e observa-se o efeito de vitrificação em escala menor [4].



Figura 1. Diferenças entre os dois tipos de amostras rochosas, Bege Bahia e Botucatu, respectivamente, após a perfuração a laser [cedido por Dario P. Prada].

Como observado, as características do pós-perfuração são muito diferentes dependendo do tipo de rocha de que se está perfurando. Assim, para entender melhor o tipo de perfuração se torna fundamental a medição das tensões que estão atuando na rocha durante e após a perfuração.

As medições de tensão são informações cruciais para estudar a estabilidade da massa rochosa durante a perfuração a laser. Em geral, os métodos mais utilizados para medir as tensões são técnicas de difração e strain-gages, que fornecem resultados quantitativos. Existem outras técnicas qualitativas, como revestimentos foto-tensivos, que indicam a localização das regiões de maior tensão, mas não fornecem números precisos.

Neste trabalho final de curso, são apresentados resultados experimentais da tensão e dano induzido em amostras de rochas carbonáticas durante a perfuração a laser. As medidas de deformação foram realizadas em amostras sob pressão confinada de 6,8 MPa (986 psi), e amostras não pressurizadas, por 10 e 30 segundos de tempo de irradiação. Especificamente, as tensões radial e circunferencial ( $\sigma_{rr}$  e  $\sigma_{\theta\theta}$ ) foram obtidas a partir das deformações radial e circunferencial ( $\epsilon_{rr}$  e  $\epsilon_{\theta\theta}$ ) usando sensores de rede de Bragg FBG (Fiber Bragg Gratings).

Este presente trabalho foi realizado no laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio (LSFO), coordenado pelo professor Arthur M. B. Braga do Departamento de Engenharia Mecânica. Este laboratório realiza pesquisas relacionadas a perfuração de rochas utilizando lasers de alta potência e possui uma linha de pesquisa voltada para sensoriamento óptico utilizando sensores de

rede de Bragg (FBG). Dessa forma, aproveitou-se desta técnica, utilizada em laboratório, para o sensoriamento de tensão induzida durante a perfuração a laser.

Todos os procedimentos de análise de dados e cálculos para o fornecimento dos gráficos apresentados nesse trabalho foi através do Origin, que é um software gráfico para análise de dados e estatística desenvolvido pela Originlab.

## **1.1. Motivação**

A motivação para a realização desse trabalho final de curso deu-se através de uma iniciação científica financiada pelo programa de bolsas da empresa Chevron, iniciada em julho de 2016 e finalizada em julho de 2017. Através da iniciação, deu-se início a alguns estudos preliminares como a introdução inicial e aprendizado da utilização do laser como ferramenta de perfuração, além de inúmeros testes de perfuração e caracterização de tensões induzidas através de sensores ópticos. Em fevereiro de 2018 deu-se início a este trabalho, que consiste em um projeto relacionado ao estabelecido e iniciado na iniciação científica.

O entendimento da interação laser-rocha é fundamental, pois a composição, permeabilidade, porosidade, bem como as condições mecânicas e térmicas determinam as características da perfuração a laser. Dessa forma, o estudo sobre a rocha em sua pós-perfuração se torna fundamental para o entendimento da perfuração e para compreender se a mesma se torna uma ferramenta auxiliar viável de aplicação no mercado.

## **1.2. Objetivos**

Os objetivos deste trabalho são divididos em objetivo geral e específico, sendo o geral medir a tensão induzida em amostras rochosas de carbonato, comumente conhecidas como Bege Bahia, utilizando sensores de rede de Bragg (FBG) durante a perfuração.

Assim, os objetivos específicos são estudar a distribuição do estado de tensão nas rochas Bege Bahia sob pressão controlada de confinamento com intuito de simular condições próximas as reais em um reservatório de petróleo, calibração dos sensores de rede de Bragg (FBG) e caracterização da rocha.

## **1.3. Estrutura do trabalho**

Inicialmente serão apresentados os conceitos básicos relacionados ao laser de alta potência, as fibras ópticas e os sensores de rede de Bragg (FBG).

Em seguida serão apontadas as metodologias, onde serão detalhados os procedimentos e a bancada experimental; e, finalmente, o resultado final e sua discussão.

## 2. CONCEITOS BÁSICOS

### 2.1. Laser

Basicamente, um laser funciona a partir da amplificação da luz por meio de uma radiação estimulada. Essencialmente um laser é construído por três partes principais:

- Fonte externa de bombeio;
- Meio ativo;
- Ressonador.

O sistema externo de bombeio conduz a energia ao laser, provocando estados excitados a fim de que haja produção de luz. A fonte atua no meio ativo emitindo fótons sobre ele, excitando um grande número de átomos para o mesmo estado. Dependendo do tipo de laser, o meio ativo pode ser constituído de várias maneiras, entre elas uma mistura de gás, por exemplo o laser de CO<sub>2</sub>, um corpo de cristal, laser YAG cujo meio de ganho ativo é o ítrio e alumínio dopado com neodímio, ou fibras ópticas, como o laser de fibra. Por último, o meio ativo do laser está localizado entre dois espelhos, o ressonador, que possui a função de amplificar a radiação do meio ativo. Assim, apenas uma parte da irradiação é refletida. Essa radiação refletida é o laser propriamente dito. A Figura 2 é um esquema simplificado dessas três partes do laser [5] [6].

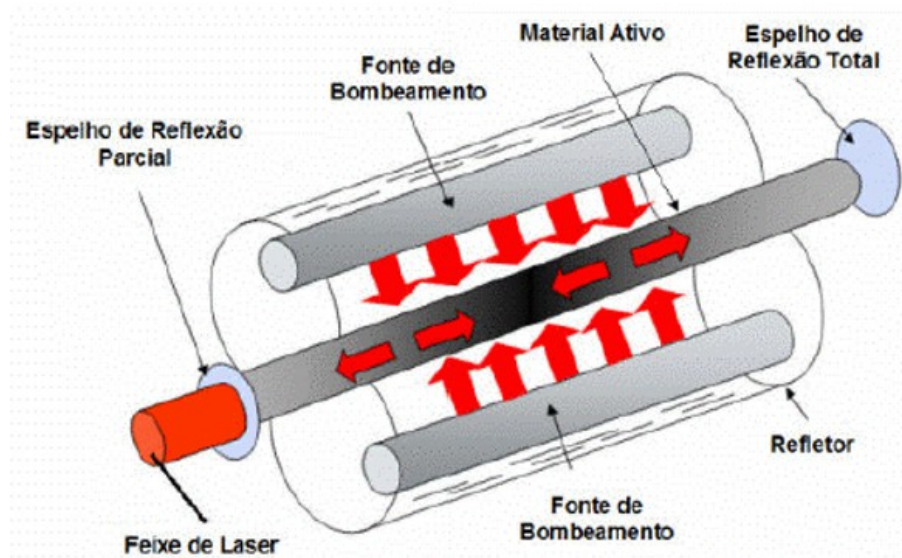


Figura 2: Distribuição esquemática de um dispositivo laser

#### 2.1.1. Laser de fibra

Laser de fibra, é um tipo de laser onde o meio ativo é uma fibra óptica do tipo monomodo dopada por alguns tipos de elementos. A luz produzida a partir do bombeio já fica em uma fibra flexível e pode ser facilmente levada a um lançador focal móvel. Dessa forma, detêm uma alta potência suportando níveis de potência contínua. Possuindo assim, um feixe de alta qualidade óptica e com difração limitada. Além disso, os lasers de fibra geralmente são mais compactos, pois a fibra pode ser dobrada e enrolada para economizar espaço.

Para a finalidade de amplificar o sinal emitido do laser, é comum a prática de dopagem do meio ativo através de certos íons, como por exemplo yttérbio, neodímio ou tálio [5].

São inseridos dois filtros de Rede de Bragg, na própria fibra, Figura 3, restringindo assim os comprimentos de onda que serão refletidos e os que passarão. Dessa forma esses filtros possuem a finalidade de trabalharem como espelhos, estabilizando assim o comprimento de onda da energia fornecida, reduzindo oscilações de intensidade focal do laser, restringindo o mesmo a ficar constante [7].



Figura 3: Desenho esquemático do laser a fibra

### 2.1.2. Laser de alta potência YLS 1500 - TR IPG Photonics

O laser utilizado nos experimentos foi o laser de fibra dopado de itérbio (Yb), YLS 1500-TR da empresa IPG Photonics, o qual possui uma potência máxima de operação de 1500W e opera de modo contínuo. O mesmo possui as especificações segundo a Tabela 1 [5].

Tabela 1: Dados técnicos do laser YLS 1500 TR.

Característica	Valor	Unidade
Modo de operação	Onda contínua	-
Potência Máxima	1500	W
Comprimento de onda da emissão	1065	nm
Largura da banda	4,8	nm
Tempo de ligar	26,8	µm
Tempo de desligar	21,6	µm
Instabilidade de potência de saída	0,2	%
Potência de saída feixe guia	937	µW

Acoplado a um controlador numérico computadorizado (CNC) que permite movimentos nos eixos X, Y, Z, o laser é controlado através do software Mach 3, que é projetado para controlar máquinas tais como CNC, tornos e fresas, sendo possível controlá-lo da maneira que desejar, desde o tempo exato de ligar o feixe incidente do laser, o tempo de incidência, distância de locomoção e seu desligamento. Tudo isso a partir de uma programação simples através de G-Code. Além disso, há um lançador que está acoplado ao laser, onde o feixe de luz é emitido para realizar a perfuração. A Figura 4 mostra a sala experimental do laser, onde na direita da imagem está o laser propriamente dito e na esquerda está a bancada experimental com o lançador do laser. É evidente na imagem os cabos de cor amarela que são as fibras ópticas em si responsável por conduzir o feixe de luz até o lançador.

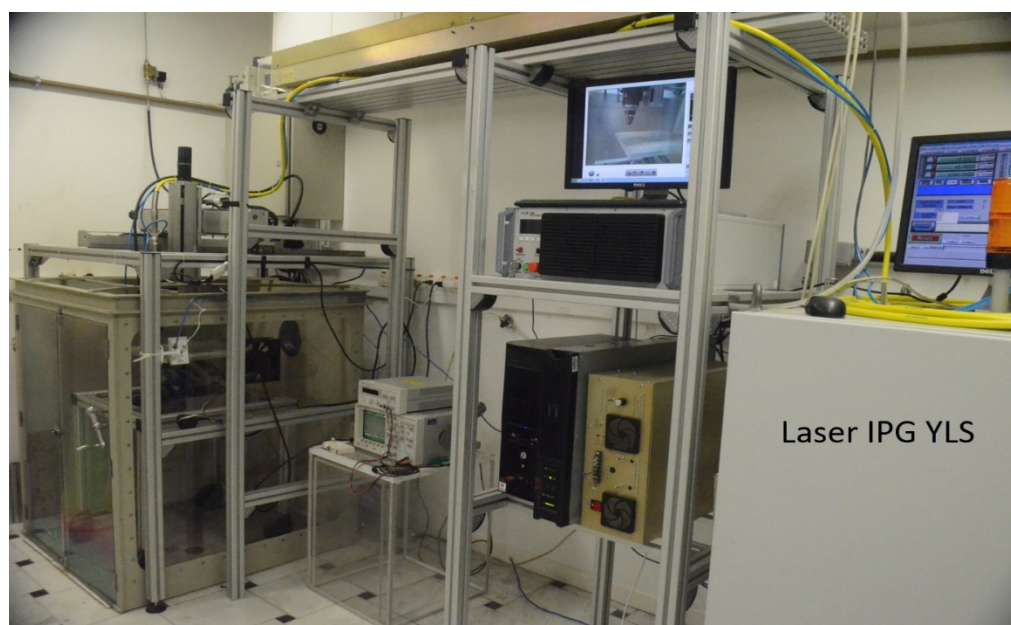


Figura 4: Foto da bancada experimental utilizada para realizar a perfuração



## 2.2. Fibra óptica

A Fibra óptica consiste basicamente de um filamento flexível de plástico ou vidro, utilizado como condutor de luz e possui seu diâmetro na ordem dos 100  $\mu\text{m}$ . Possui como características principais:

- perda de transmissão muito baixa;
- imunidade à interferência eletromagnética e ruídos;
- isolamento elétrico.

Composta por 3 partes, como pode ser visto na Figura 5, a fibra óptica possui o núcleo central cilíndrico envolvido por uma camada de um material com menor índice de refração, a casca, viabilizando a reflexão total e a transmissão do feixe, e. por último há uma capa protetora feita geralmente de material plástico, protegendo o interior da fibra contra danos mecânicos [8].

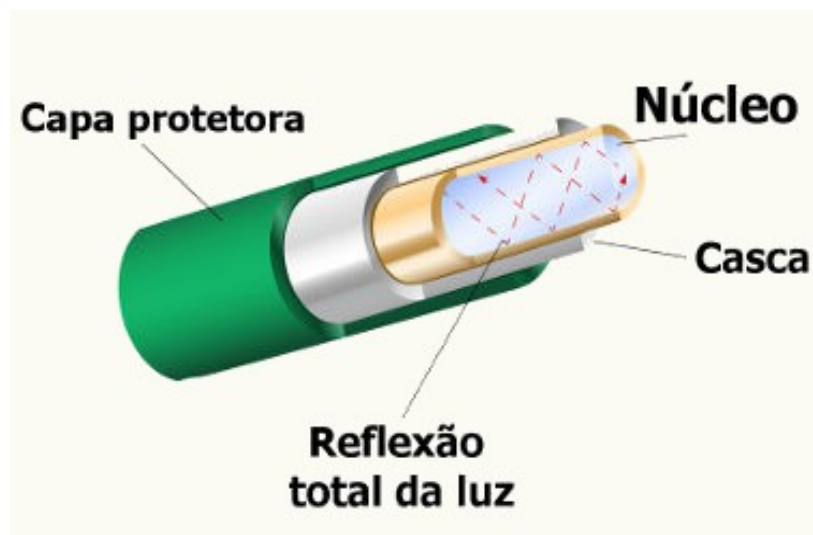


Figura 5: Representação da fibra óptica.

O princípio de funcionamento de uma fibra óptica é único. Primeiramente, um feixe de luz é incidido em uma das extremidades da fibra e por meio de reflexões sucessivas o feixe atravessa toda sua extensão. A transmissão da luz ocorre no núcleo graças ao o fenômeno de reflexão total, que depende da diferença de índice de refração entre o revestimento e o próprio núcleo, sendo que o núcleo sempre irá possuir um índice de refração maior, e também depende do ângulo de incidência do feixe de luz. Dessa forma, a luz é sempre mantida dentro do núcleo através de reflexões internas

sucessivas, funcionando como uma espécie de guia para o feixe, transmitindo assim a luz entre as duas extremidades da fibra.

A reflexão total de um feixe de luz segue a lei matemática de Snell-Descartes:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

onde  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração dos meios em estudo, o núcleo e a casca.

Dessa forma, para ter a reflexão total do feixe de luz, o  $\theta_1$  tem de ser maior do que o  $\theta_{\text{crítico}}$ , o qual ocorre quando o ângulo de refração for de  $90^\circ$ , portanto:

$$\sin \theta_{\text{crítico}} = \frac{n_{\text{casca}}}{n_{\text{núcleo}}} \quad (2)$$

Pode-se observar na Figura 6, o fenômeno de reflexão total de um feixe de luz dentro de uma fibra óptica seguindo suas reflexões sucessivas [9].

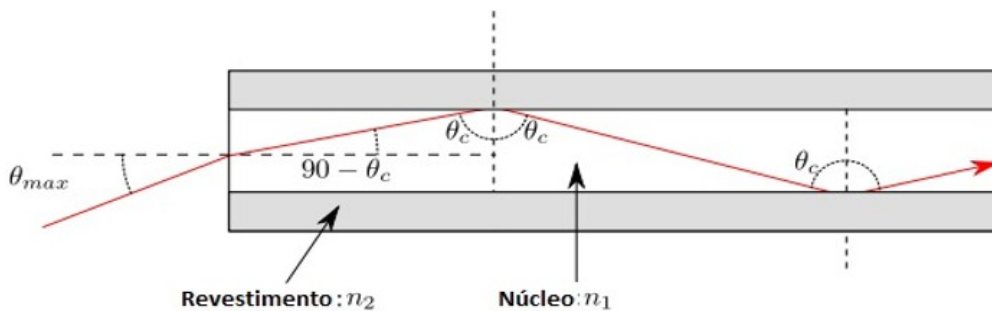


Figura 6: Raios de luz se propagando dentro de uma fibra óptica com reflexão total.

As fibras ópticas podem ser divididas de acordo com seu tipo de propagação [10] [11]:

- **Fibras Multimodo**

Para este tipo de fibra, vários feixes de luz (modos) se propagam simultaneamente pelo mesmo cabo. A existência de vários modos de propagação provoca a chamada dispersão modal, que basicamente é o alargamento dos pulsos emitidos. Dentre as fibras multimodo existem dois tipos diferentes:

- Salto de índice (Figura 7): neste tipo de cabo, o núcleo possui um índice de refração único e uniforme, fazendo com que a luz se propague refletindo-se através da diferença única dos índices de refração entre o núcleo e a casca.
- Gradiente de índice (Figura 8): para este tipo de cabo multimodo, o núcleo possui um índice de refração variável, decrescendo progressivamente do centro para a borda do cabo.

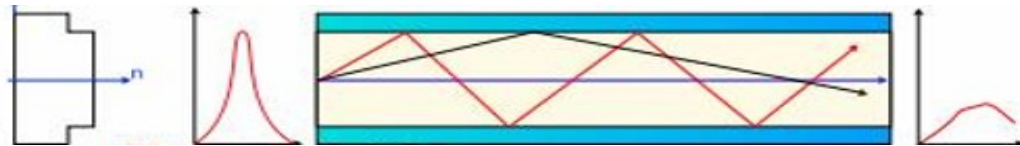


Figura 7: Fibra óptica multimodo de salto de índice

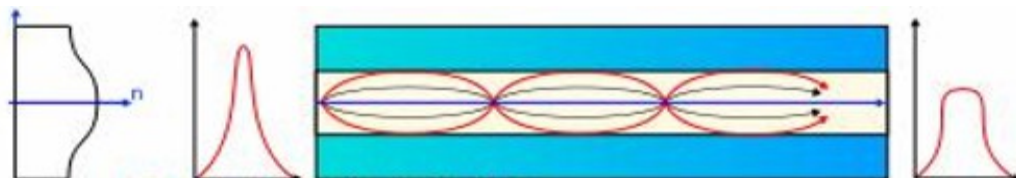


Figura 8: Fibra óptica multimodo de gradiente de índice

- **Fibras Monomodo**

As fibras monomodo (Figura 9) possuem o núcleo muito menor quando comparado com os do tipo multimodo. Esses tipos fibras ópticas, permitem que se propague somente um feixe de luz por vez. Dessa forma, o problema de dispersão modal diminui bastante conseguindo assim uma largura de banda elevada. [12]



Figura 9: Fibra óptica monomodo

## 2.3. Sensores a fibra óptica

Existem vários tipos sensores a fibra óptica, tais como os de efeito não linear, sensores distribuídos (DTS, DTSS e DAS), interferométricos, entre outros. Quanto ao local de interrogação, os sensores a fibra óptica podem ser classificados em duas grandes classes [13][14]:

- **Extrínsecos**

Esses tipos de sensores utilizam a fibra como transmissor e não como o sensor propriamente dito. Utiliza-se a fibra óptica como um transporte do sinal para o local em que será feito o sensoriamento. A luz atravessa todo o caminho da fibra até o local em que se deseja fazer o sensoriamento. Neste ponto o feixe de luz é desacoplado da fibra e então é direcionada até o

sensor onde será feito a modulação do sinal. Em seguida esse feixe de luz é reacoplado na fibra e então ele segue o caminho normal até o ponto de processamento.

- **Intrínsecos**

Ao contrário do extrínseco, esse tipo de sensor funciona de tal maneira que a própria fibra é o sensor, sem a necessidade de desacoplar e reacoplar o feixe, diminuindo assim perdas que podem ocorrer na hora da medição. Para esse caso, a fibra óptica funciona como o próprio elemento sensorial, sem a necessidade de interromper o feixe de luz, diminuindo assim as perdas.

Quanto às suas configurações, os sensores a fibra óptica dividem-se em três categorias:

- **Sensores Pontuais**

O sensor pontual é definido em único ponto da fibra óptica, onde somente naquele lugar em específico ocorre a interrogação sensorial.

- **Sensores Multiponto**

O sensor multiponto, funciona basicamente igual ao um sensor pontual, com a única diferença de que existem vários sensores pontuais em uma mesma fibra, fazendo com que em vários pontos ocorra o sensoriamento.

- **Sensores Distribuídos**

Para esse tipo de sensoriamento, a fibra como um todo é o próprio sensor, dessa forma há um número infinito de sensores sobre a fibra óptica.

## **2.4. Sensores a rede de Bragg: FBG (Fiber Bragg Grating)**

Um sensor a rede de Bragg (FBG) é uma microestrutura que corresponde a uma modulação do índice de refração do núcleo da fibra óptica. Classificado como um sensor pontual intrínseco, com comprimento típico de alguns milímetros, ele é inserido no núcleo de uma fibra monomodo. Basicamente, uma FBG é uma variação periódica no índice de refração do núcleo da fibra. Sua estrutura funciona como um filtro reflexivo estreito, que satisfaz a relação de Bragg:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (3)$$

onde  $\lambda_B$  é o comprimento de onda de Bragg,  $n$  é o índice de refração do núcleo da fibra óptica e  $\Lambda$  é o período da modulação do índice de refração. A FBG é um filtro reflexivo, que seleciona um comprimento de onda específico para ser refletido, permitindo a passagem de luz com outros comprimentos de onda. O comprimento de onda em que essa reflexão ocorre,  $\lambda_B$ , é chamado de

comprimento de onda de Bragg. A Figura 10 mostra esquematicamente o funcionamento de um sensor FBG acoplado a uma fibra óptica. Observa-se que somente uma parte do espectro de luz é refletida, enquanto o resto do espectro continua a ser transmitido [15].

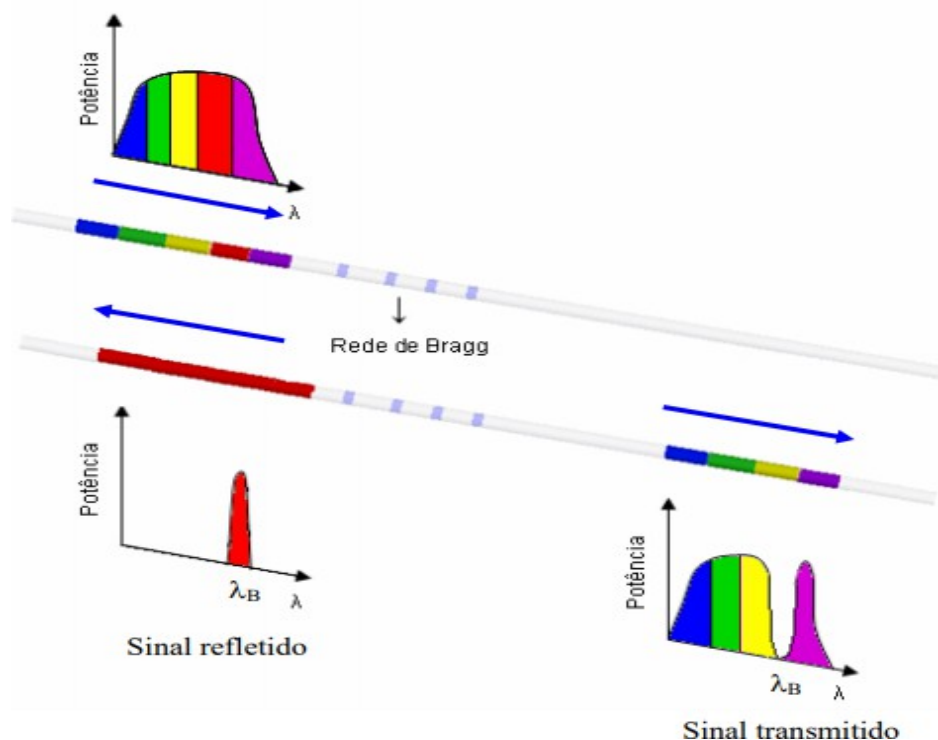


Figura 10: Desenho esquemático do funcionamento espectral de um sensor FBG

Um feixe incidente na rede de Bragg, terá uma parcela refletida, enquanto o restante do feixe continua seu trajeto original pela fibra. Assim, quando a rede de Bragg estiver sob efeito de esforços mecânicos em conjunto com uma variação de temperatura, ou simplesmente os esforços atuando em temperatura constante, haverá uma variação na periodicidade do feixe de luz refletido, resultando em uma variação da modulação do índice de refração.

O comprimento de onda de Bragg varia linearmente com a deformação e/ou temperatura que estão atuando na rede de Bragg, podendo assim medir estas duas grandezas. Portanto, existe um acoplamento de temperatura e deformação nos resultados obtidos pelos sensores de rede de Bragg (FBG). Para isolar uma grandeza da outra, é preciso ter um sensor só para medir um e separar o outro resultado.

Como somente uma parte do espectro é refletida pelo sensor de Bragg e a outra continua a ser transmitida pela fibra, permite-se a instalação de vários sensores em uma mesma fibra, possibilitando assim a multiplexação de sensores. Pode-se conectar diversos sensores em uma única

fibra, possuindo uma separação entre eles mínima de milímetros e máxima chegando até a quilômetros de distância. Ressalta-se que com uma só fibra é possível monitorar vários pontos de interesse.

Portanto, há uma relação devido a deformação aplicada e/ou temperatura para cada variação de comprimento de onda em um sensor de rede de Bragg. Nesse sentido, o deslocamento relativo no comprimento de onda de Bragg,  $\Delta\lambda/\lambda_B$ , devido a uma deformação aplicada ( $\varepsilon$ ) e uma mudança na temperatura ( $\Delta T$ ) é aproximadamente dado na equação 4 [16]:

$$\Delta\lambda/\lambda_B = 0,78 \varepsilon + 9 \times 10^{-6} \Delta T \quad (4)$$

### 3. METODOLOGIA

A metodologia experimental para a realização dos estudos, está dividida nas etapas abaixo.

#### 3.1. Caracterização das rochas

Os espécimes consistem em amostras de carbonato cilíndricas, comumente conhecidos como Bege Bahia, com 63,25 mm de altura e 53,7 mm de diâmetro. Inicialmente, a composição química das amostras foi determinada por fluorescência de raios X e por análise quantitativa com o método de Ritveld, que demonstrou a presença de altas concentrações de minerais carbonáticos na fase cristalina.

Os ensaios de porosidade petrofísica e permeabilidade foram realizados a pressão de confinamento de 2500 Psi no equipamento de perímetro-porosímetro automatizado DV-4000 / Weatherford com a capacidade de medir permeabilidades variando de 0,00001 mD a 40 D e porosidade entre 0,05 % e 40 %.

A porosidade e a permeabilidade das rochas foram calculadas automaticamente pelo equipamento, com base na lei de Boyle-Marriot e na lei de Darcy, respectivamente. Todos os valores médios de medição dos dados experimentais estão resumidos na Tabela 2. Como resultados, as rochas são caracterizadas por baixa permeabilidade, porosidade e densidade de grãos.

Estas caracterizações foram realizadas no laboratório da Petrobrás com o apoio do aluno de doutorado Dario Prada.

Tabela 2: Caracterização do Bege Bahia [cedido por Dario P. Prada].

<b>Elemento</b>	Ca - 59 % O - 29.2 % Na - 6.41 % Mg - 1.36 % Si - 1.18 % Cl - 0.70 % K - 0.54 % Al - 0.44 % S - 0.24 % Fe - 0.19 %
<b>Mineral</b>	93% CaCO <sub>3</sub> ; 1.08% SiO <sub>2</sub> ; 5.88% CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
<b>Porosidade</b>	2.2%
<b>Densidade de grão</b>	2.7g/cc
<b>Permeabilidade</b>	1μd

### 3.1.1. Instrumentação dos sensores na rocha

Neste trabalho, para monitorar a deformação induzida durante a perfuração a laser, sensores de fibra óptica de rede de Bragg (FBG), com um comprimento físico de aproximadamente 8 mm foram instalados na superfície normal ao eixo do feixe incidente do laser.

Para cada teste de perfuração, quatro sensores FBG foram aderidos à superfície superior das amostras, sendo dois circunferenciais e dois radiais, denominados  $\epsilon_{rr}$  e  $\epsilon_{\theta\theta}$ , respectivamente, localizados em aproximadamente 15 mm do centro, como mostrado na Figura 11.

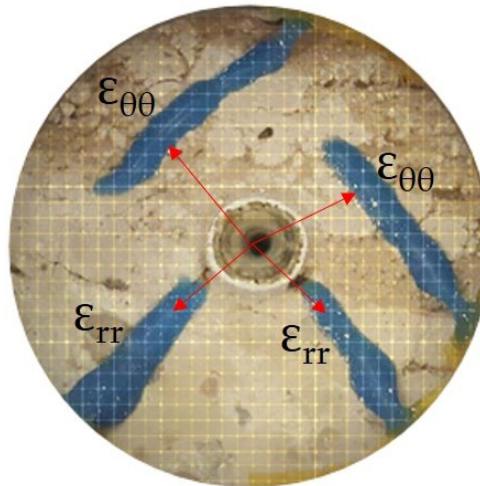


Figura 11: Distribuição dos sensores FBG [cedido por Dario P. Prada].

Os comprimentos de onda refletidos dos sensores FBG foram monitorados usando um interrogador óptico, Micron Optics SM 125, Figura 12, e as correspondentes deformações transversais  $\epsilon_{rr}$  e  $\epsilon_{\theta\theta}$  foram determinadas a partir dele. A tabela 3 mostra as especificações do interrogador [17].



Figura 12: Interrogador óptico Micron Optics SM 125.



Tabela 3: Propriedades de performance do Micron Optics SM 125 [cedido por Dario P. Prada].

Números de canais ópticos	4
Frequência de escaneamento	2 Hz
Alcance do comprimento de onda	1510-1590 nm
Estabilidade/Precisão do comprimento de onda	1; 1 pm
Repetibilidade do comprimento de onda	0.5 pm a 1 Hz, 0.2 pm a 0.1 Hz
Alcance dinâmico	50 dB
Capacidade típica do sensor FBG	60 - 120
Medição do espectro completo	Incluído
Compatível com o interruptor sm041	Sim
Conectores ópticos	FC/APC

### 3.2. Metodologia dos testes

Foi utilizado o laser seguindo o perfil de potência indicado na Figura 13. Na primeira fase aumenta de 0 a 1050 W em um período de 0,1 segundo, na segunda fase a potência constante é mantida por determinados períodos de tempo (10 e 30 segundos) e finalmente uma terceira fase onde se diminui a potência de 1050 W para 0, que coincide com o desligamento do laser.

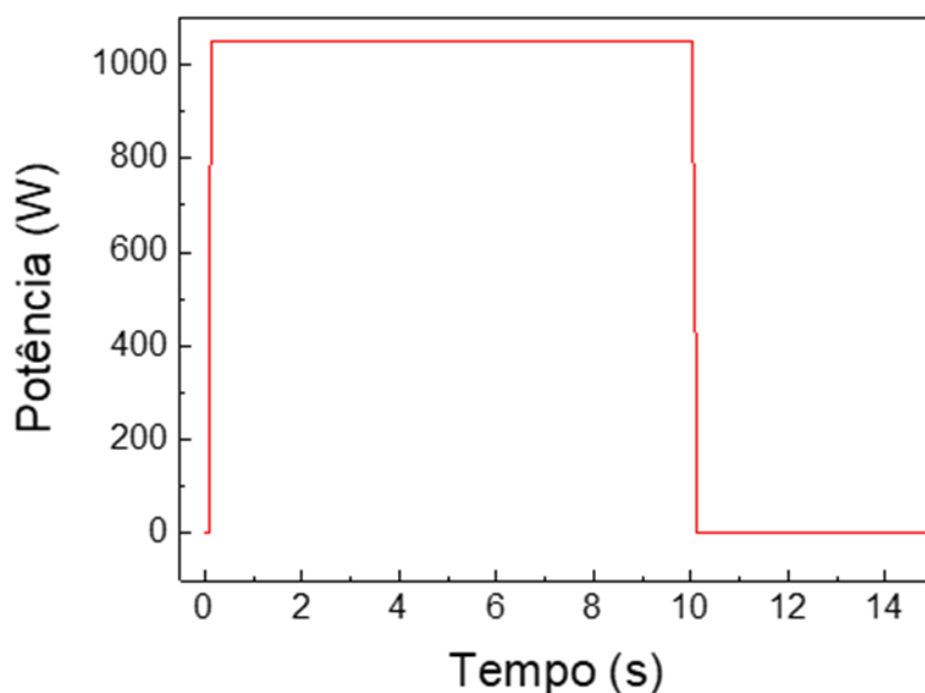


Figura 13: Curva de potência do laser [cedido por Dario P. Prada].

Foram realizados dois tipos de testes principais, uma perfuração em amostras não pressurizadas e uma em amostras pressurizadas, com o intuito de simular condições próximas de confinamento de um poço de petróleo.

Para isso foi utilizado um vaso de pressão disponível no laboratório projetado para acomodar o corpo de prova e permitir a aplicação da pressão de confinamento [3]. Basicamente, o vaso de pressão consiste em um corpo cilíndrico e duas tampas perfuradas. As portas hidráulicas são acopladas ao corpo cilíndrico, uma para conectar a bomba que fornece pressão e outra como uma válvula de alívio. É importante ressaltar que as rochas são separadas por uma membrana de silicone que evita o contato direto entre a amostra e o óleo utilizado para transferir a pressão aplicada, pois, caso contrário, poderia pegar fogo (Figuras 14(a) e 14(b)).

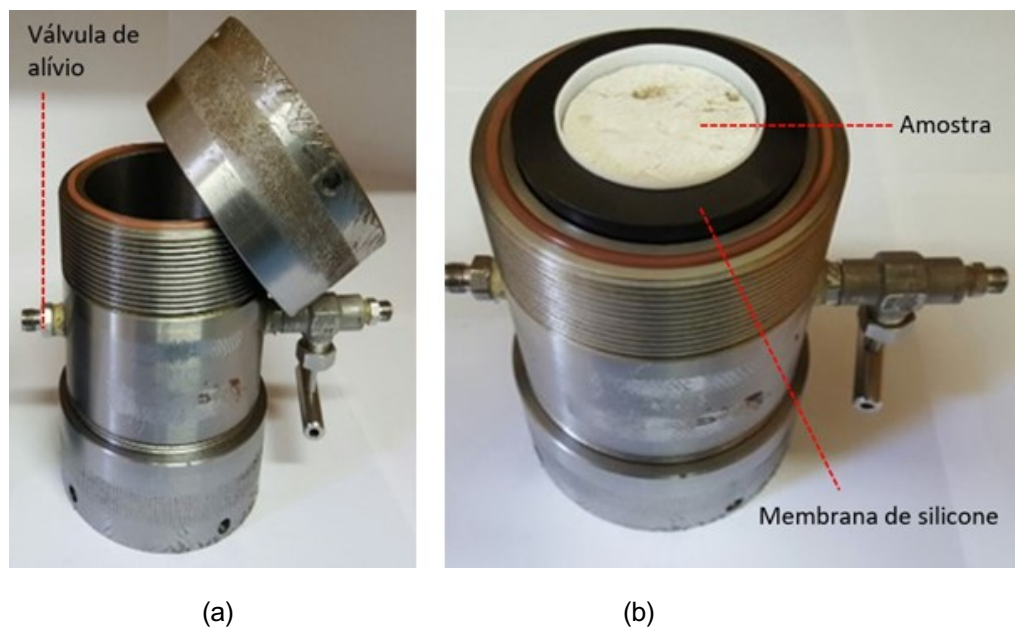


Figura 14: a) Vaso de pressão desmontado. b) Vaso de pressão com a amostra rochosa inserida pela membrana de silicone [cedido por Dario P. Prada].

Para a aplicação da pressão de confinamento utilizou-se uma bomba hidráulica manual da empresa Enerpac, como pode ser visto na Figura 15, e possui as especificações segundo a tabela 4.



Figura 15: Bomba hidráulica Enerpac.

Tabela 4: Especificações bomba hidráulica Enerpac.

Pressão máxima de trabalho (bar)	700
Pressão Nominal 2 estágio (bar)	7002
Compatibilidade do Cilindro	Simples Ação
Capacidade do Reservatório ( $cm^3$ )	901
Capacidade de óleo utilizável ( $cm^3$ )	901
Vazão Máxima na Pressão Nominal	2,47 $cm^3$ /bombada
Deslocamento de Óleo por Bombada ( $cm^3$ )	2,47
Esforço Máximo da Alavanca (kg)	38,6
Curso do Pistão (mm)	25,4
Operação da Válvula	Manual
Fonte de Energia	Manual
Peso (kg)	4,1

### 3.3. Condições de contorno

A geometria e as condições de contorno seguem o perfil a seguir de acordo com a Figura 16, sendo evidente a pressão de confinamento aplicada na parte lateral da amostra enquanto o laser foi focado no centro da amostra.

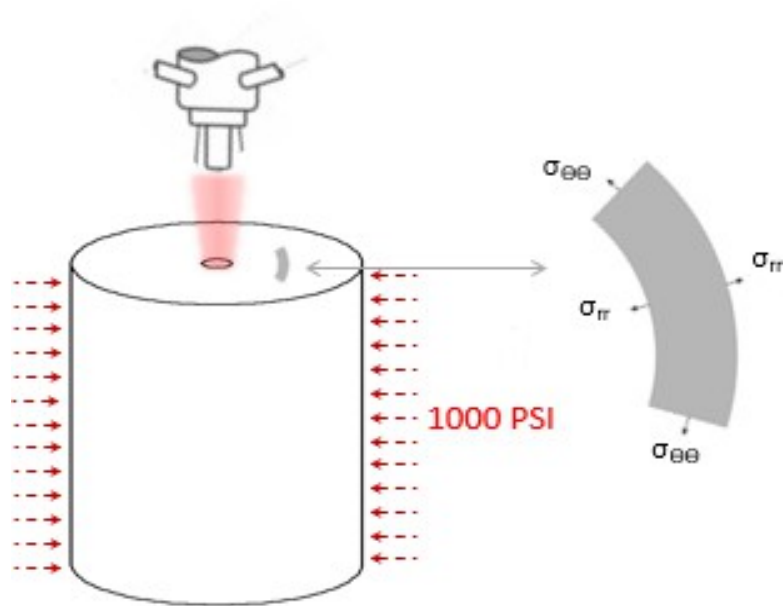


Figura 16: Diagrama esquemático das condições de contorno do experimento de perfuração a laser.

A Figura 17 mostra a bancada experimental final, com todos os sensores acoplados, a amostra e a mesma já inserida no vaso de pressão pressurizado, prestes a entrar no local onde o laser será acionado e a válvula acoplada a bomba hidráulica que está sendo aplicada a pressão de confinamento. Percebe-se os cabos azuis, que são as fibras ópticas ligadas aos sensores FBG e ao interrogador óptico. Fez-se um zoom na parte superior da bancada para mostrar como são distribuídos os sensores, sendo em todos os testes a mesma configuração 2 radiais e 2 circunferenciais.

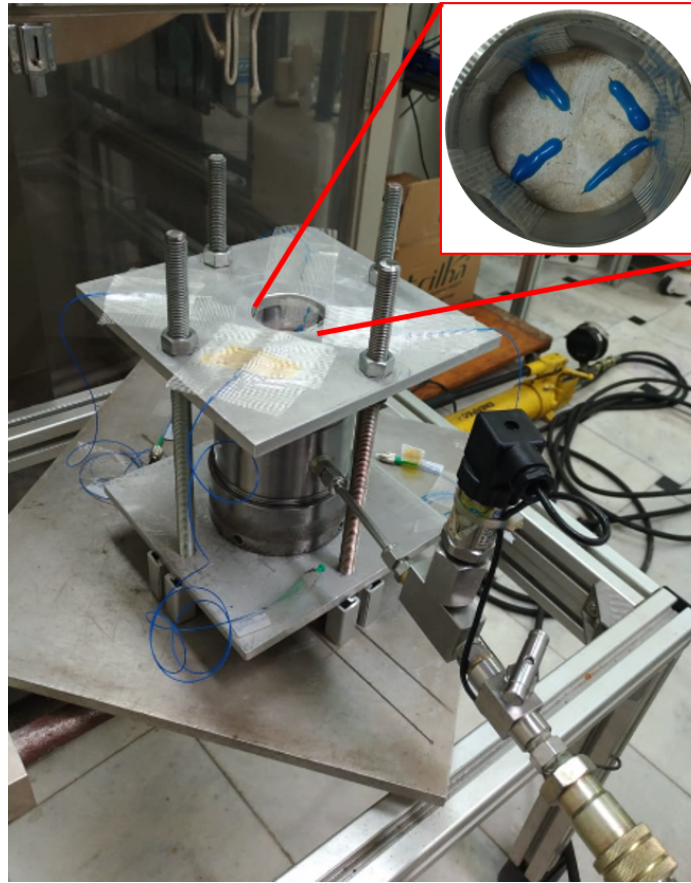


Figura 17: Bancada experimental final [cedido por Dario P. Prada].

### 3.4. Considerações mecânicas

Tensões circunferenciais e radiais ( $\sigma_{\theta\theta}$  e  $\sigma_{rr}$ ) atuando na amostra durante a perfuração a laser podem ser representadas como um estado de tensão de um cilindro de parede espessa sujeito a carga interna e externa. A carga interna resulta da expansão devido à mudança térmica e da carga externa à pressão aplicada através do vaso de pressão. Assim, assumindo uma distribuição de tensão plana e usando a lei de Hooke, as tensões radiais e circunferenciais podem ser determinadas com as seguintes equações de tensão-deformação [18]:

$$\sigma_{rr} = \frac{E}{1 - \nu^2} * (\epsilon_{rr} + \nu * \epsilon_{\theta\theta}) \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E}{1 - \nu^2} * (\epsilon_{rr} + \nu * \epsilon_{\theta\theta}) \quad (6)$$

Onde:

$\nu$  – coeficiente de Poisson (0.25);

$E$  – constante de elasticidade (20 MPa).

As deformações circunferenciais ( $\epsilon_{\theta\theta}$ ) e radial ( $\epsilon_{rr}$ ) são obtidas pela equação 3 descrita anteriormente.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1. Calibração dos sensores

Considerando que os sensores de rede de Bragg são suscetíveis tanto a deformação quanto a temperatura, foi decidido fazer uma calibração única e exclusivamente para incluir o efeito da temperatura nos valores obtidos pelos sensores e obter um resultado mais próximo da realidade para as deformações nas amostras.

A calibração foi realizada em uma amostra cúbica de Bege Bahia posicionando 3 sensores na sua superfície. Dois deles na superfície superior e outro posicionado lateralmente conforme a Figura 18.



Figura 18: Amostra rochosa de Bege Bahia utilizada para a calibração.

Durante o teste de calibração, a amostra foi inserida em uma estufa e submetida a um ciclo de subida e descida de temperatura. O ciclo começou partindo de 20 °C e a cada 1 hora aumentava-se a temperatura em 10 °C até os 50 °C. Após a subida, a descida foi realizada de forma inversa, chegando novamente até os 20 °C. Os sensores estavam ligados ao interrogador óptico e a cada segundo foi capturado o comprimento de onda em cada um.

A Figura 19 representa as variações do comprimento de onda para os sensores instrumentados na amostra durante as 8 horas de teste.

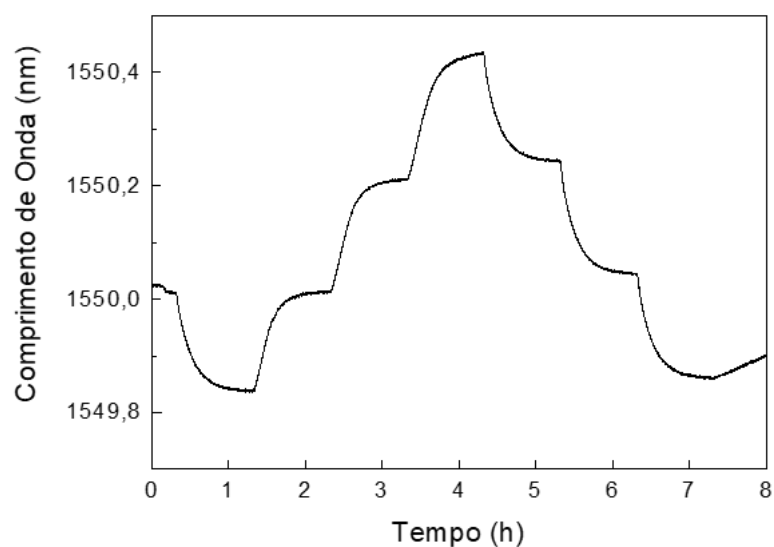


Figura 19: Curva de calibração dos sensores obtidos pelo interrogador óptico.

A partir da obtenção da curva de calibração, foi estimado o valor médio para cada degrau de temperatura e seu desvio padrão conforme a Figura 19. A sensibilidade dos sensores foi obtida a partir de um ajuste linear chegando ao valor de 0,022 °C/nm, conforme a equação abaixo:

$$\frac{1529,95 - 1529,27}{50 - 20} = 0,022 \quad (7)$$

Portanto,  $\Delta\lambda T / T = 0,022\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ .

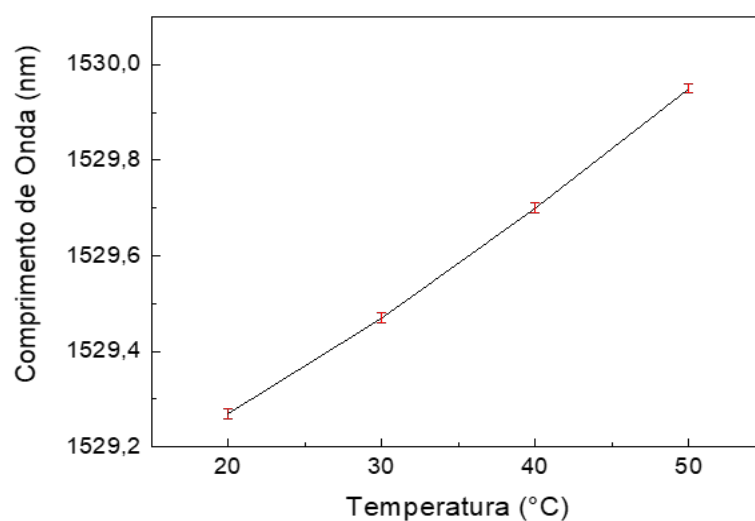


Figura 20: Curva  $\Delta\lambda T / \Delta^{\circ}\text{C}$  para estimar a sensibilidade dos sensores



## 4.2. Medidas térmicas

Inicialmente foram testados alguns sensores, como por exemplo termopares, para a medição da temperatura, porém dadas as restrições de espaço e o plasma derivado do material ejetado durante a perfuração a laser, nenhum dos vários sensores testados funcionou corretamente para a medição de temperatura durante a perfuração. Diante desta dificuldade, decidiu-se utilizar uma câmera digital térmica, embora ela só possa ser operada quando o laser é desligado.

A Figura 21 mostra o momento exato do início do monitoramento térmico das amostras e a bancada experimental, evidenciando a amostra ainda incandescente debaixo do laser já desligado.



Figura 21: Monitoramento térmico da amostra pós-perfuração

A Figura 22 mostra uma fotografia da amostra logo após o laser ter sido desligado. Como observado, a região adjacente à perfuração está incandescente. Usando a câmera térmica, modelo FLIR SC 660, a temperatura em 5 segundos após o desligamento do laser foi estimada acima de 773 K na zona de perfuração e aproximadamente 370 K próximo a região onde os sensores FBG foram conectados.

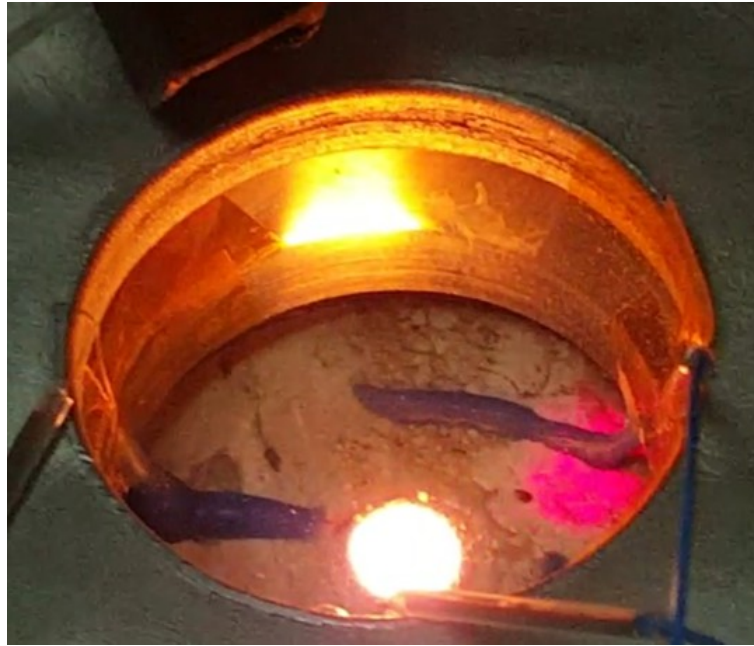


Figura 22: Fotografia da amostra rochosa 5 segundos após ao desligamento do laser.

Nas imagens térmicas mostradas na Figura 23, observa-se claramente a propagação do calor, além disso, é possível visualizar a posição dos sensores FBG.

Usando essas imagens, a temperatura para cada sensor FBG foi determinada ao longo do tempo do teste. Posteriormente, esses valores de temperatura foram utilizados para compensar o efeito térmico nos sensores FBG e garantir apenas as medições de deformação.

Com os resultados do teste de calibração de temperatura, foi feita uma interpolação do gráfico para se obter a mesma quantidade de pontos que a curva da deformação. Nesse sentido:

$$\Delta\lambda_T(nm) = T(^{\circ}C) * 0,022 \frac{nm}{^{\circ}C} \quad (8)$$

Dessa forma calcula-se a variação do comprimento de onda devido apenas a deformação utilizando a equação abaixo:

$$\Delta\lambda_{\epsilon} = \Delta\lambda_{Total} - \Delta\lambda_T \quad (8)$$

Nos referidos testes determina-se a tensão a partir dos resultados acoplados de temperatura e deformação.

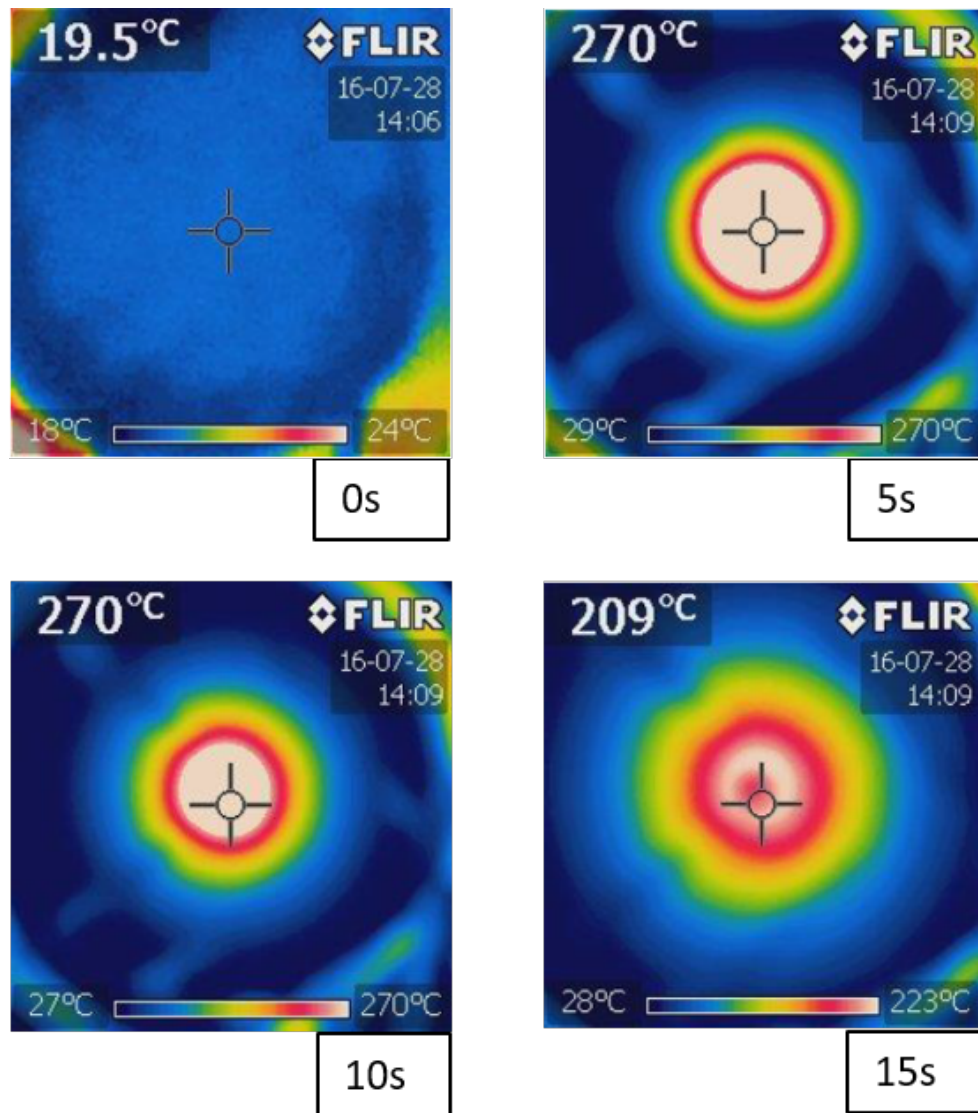


Figura 23: Fotografias térmicas sequenciais da superfície da amostra após a perfuração a laser [cedido por Dario P. Prada].

#### 4.3. Tensão medida durante a perfuração a laser

As Figuras 24 e 25 mostram as tensões típicas medidas durante e após a perfuração a laser em amostras com e sem pressão de confinamento radial, para os sensores radiais (R) e circunferenciais (C).

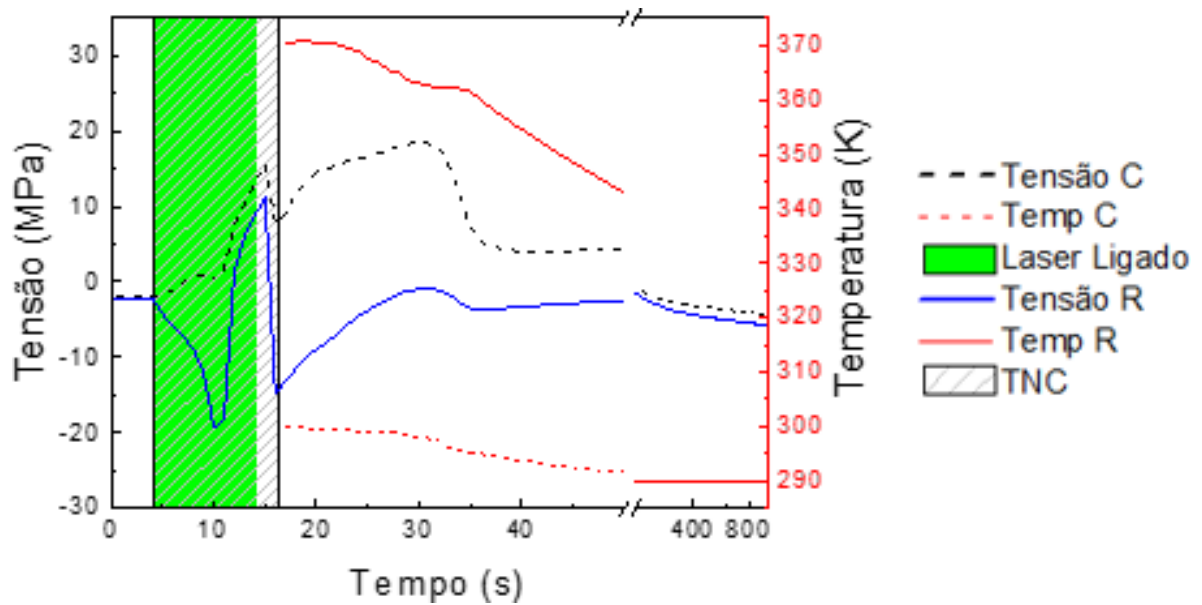


Figura 24: Distribuição de tensão com pressão de confinamento com 10 minutos de perfuração a laser

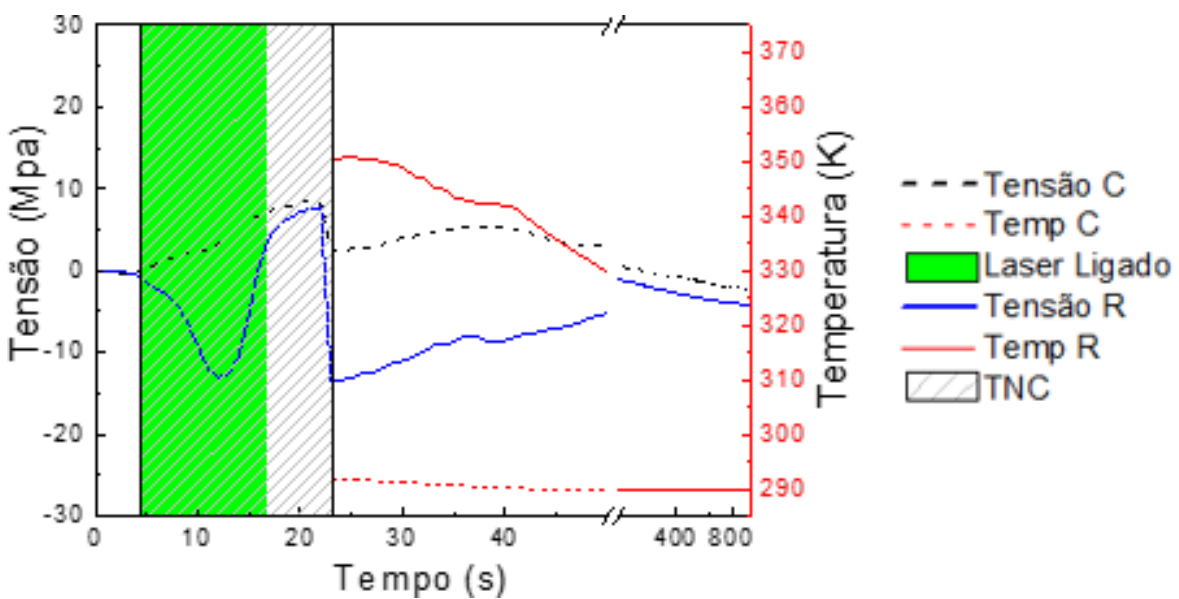


Figura 25: Distribuição de tensão sem pressão de confinamento com 10 minutos de perfuração a laser

A área verde corresponde ao período de tempo em que o laser esteve ligado, neste caso 10 segundos, e a área tracejada condiz com a área onde a temperatura não está compensada (TNC), está relacionada com o tempo em que as medidas de tensões não foram compensadas termicamente. A linha azul sólida e preta pontilhada refere-se à tensão radial e circunferencial, respectivamente. As linhas vermelha sólida e tracejada correspondem a temperatura medida a partir das imagens térmicas para os sensores radial e circunferencial respectivamente.

Note que a temperatura só foi medida após o laser ter sido desligado. Então, considerando que o FBG é sensível não apenas à deformação, mas também à temperatura, as medidas de tensão mostradas na área tracejada não são exatamente de tensão. É o resultado da relação cruzada entre tensão e temperatura.

Como é mostrado na Figura 24 antes da ativação do laser, o estado de tensão teórico é a compressão biaxial, com  $\sigma_r = \sigma_\theta = -p$  para o caso quando a pressão foi aplicada e  $\sigma_r = \sigma_\theta = 0$ , quando nenhuma pressão foi aplicada, veja Figura 25.

Cabe ressaltar que o valor experimental medido é inferior ao valor teórico, e isto pode estar relacionado com alguns motivos, como por exemplo um coeficiente de transferência do sensor FBG inferior a 1, que significa que não houve uma colagem perfeita do mesmo sob a superfície da amostra rochosa, podendo ser explicado pelo fato da camada de adesivo entre o sensor e a rocha ser relativamente grande ou existir a presença de micro bolhas no adesivo. Adicionalmente este resultado também pode estar relacionado a heterogeneidade da rocha Bege Bahia.

Imediatamente após o laser ser ativado, a tensão radial é compressiva e a tensão circunferencial é tensiva, como esperado, devido ao grande gradiente de temperatura entre o centro da rocha, onde o raio laser está focalizado, e a região adjacente. Isso resulta em compressão nos sensores posicionados radialmente. Este fato foi comum a ambos os grupos de amostras, isto é, amostras pressurizadas e não pressurizadas.

No entanto, após alguns segundos, observou-se que a tensão radial alterou-se de compressivo para tensivo. Acontece aproximadamente 20% mais rápido na amostra pressurizada em comparação com amostras não pressurizadas.

Os sensores não são compensados em temperatura na área tracejada. Essa mudança indica que a medição não corresponde apenas à carga mecânica. De fato, o efeito térmico está dominando e isso causa uma mudança. O calor resulta da interação entre o material ejetado e o feixe incidente formando um plasma e, via convecção, aquece todos os sensores FBG.

Assim que o laser é desligado, a tensão é compensada pela temperatura. Por alguns minutos, observou-se que as tensões circunferenciais e radiais continuaram a crescer. Uma diminuição gradual é observada até que um estado compressivo é alcançado. Por outro lado, a temperatura está sempre diminuindo até atingir a temperatura ambiente.

Em geral, pode-se afirmar que as tensões nas amostras pressurizadas foram sempre maiores do que nas amostras não pressurizadas, assim como a taxa de mudanças de tensão, que foram maiores nas amostras pressurizadas.

A comparação entre os testes com e sem a pressão confinante mostra que ambos têm o mesmo comportamento (tração e compressão).

#### **4.4. Análise de raio-X scan da perfuração a laser**

Para a aquisição das imagens tomográficas das amostras, foi utilizado o microtomógrafo ZEISS Zeiss Xradia 510 Versa com resolução espacial de  $0,6 \mu\text{m}$  e tensão entre 30kV e 60kV.

Para caracterizar a morfologia da perfuração a laser em amostras sob pressão confinante e sem pressão, realizou-se tomografia computadorizada por raios X da profundidade da perfuração. As Figuras 26 e 27 mostram a perfuração da amostra não pressurizada e pressurizada, respectivamente.

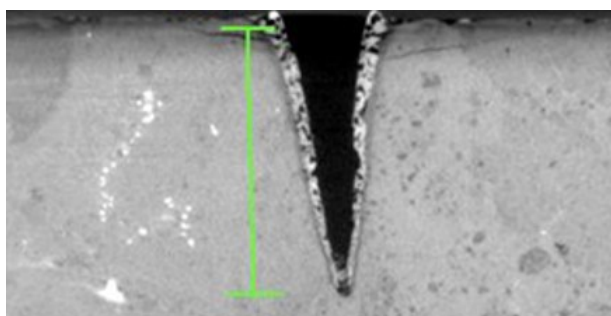


Figura 26: Imagens de raio-X da perfuração da amostra não pressurizada em 10 segundos de ação do laser [cedido por Dario P. Prada].

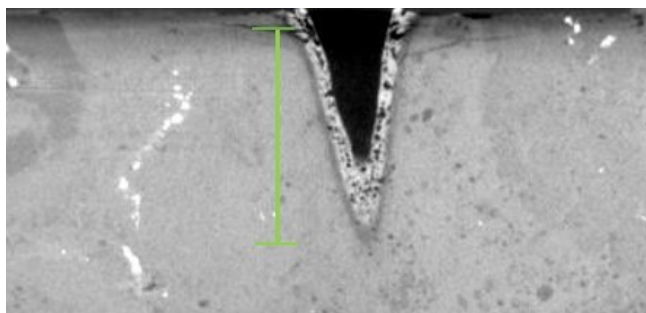


Figura 27: Imagens de raio-X da perfuração da amostra pressurizada em 10 segundos de ação do laser [cedido por Dario P. Prada].

Percebe-se que o furo da perfuração da amostra não pressurizada possui uma profundidade maior e em volta do furo possui uma concentração menor de rocha vitrificada do que na amostra que foi pressurizada, evidenciando que a pressão de confinamento altera um pouco as condições de pós-perfuração.



Também foram feitas fotografias da seção transversal ao longo da profundidade da perfuração, Figuras 28 e 29, para estudar as camadas mais próximas da superfície.

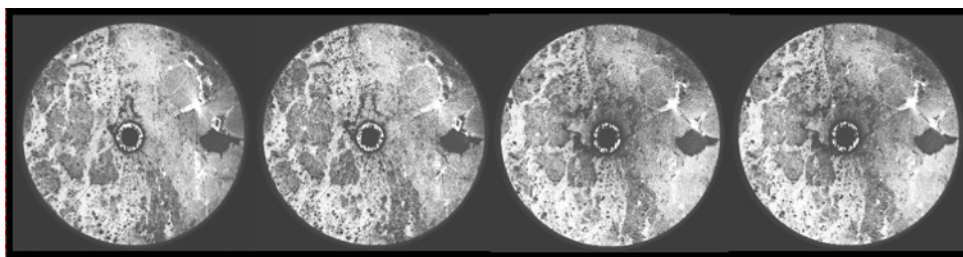


Figura 28: Imagens de raio-X das seções transversais da amostra não pressurizada em 10 segundos de ação do laser [cedido por Dario P. Prada].

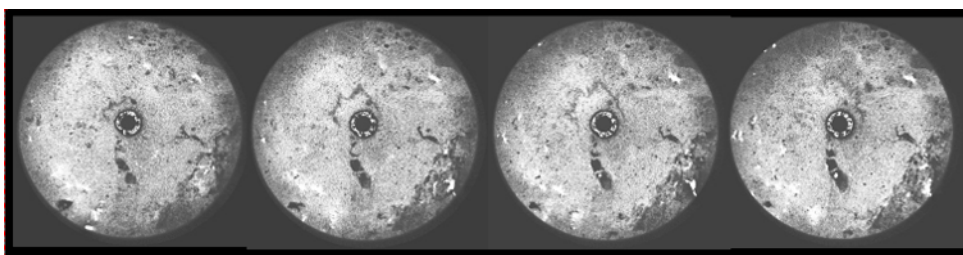


Figura 29: Imagens de raio-X das seções transversais da amostra pressurizada em 10 segundos de ação do laser [cedido por Dario P. Prada].

Ao longo da profundidade, cada uma das imagens, da esquerda para a direita representa várias camadas da amostra, indo da profundidade de aproximadamente 2 mm até a superfície. Observa-se que o laser penetra parcialmente nos espécimes. A energia específica, definida como a potência necessária para remover um volume unitário de rocha, era de 79,5 KJ/cm<sup>3</sup> e 75,5 kJ/cm<sup>3</sup> para a amostra pressurizada e para os não pressurizados, respectivamente. [3]

No caso da amostra pressurizada, a zona afetada pelo calor era aproximadamente 30 % maior que a não pressurizada, como esperado, porque na amostra pressurizada o calor é mais facilmente transmitido. Além disso, nas imagens de varredura de raio-X, um anel de sombra ao redor do buraco pode ser observado. Seu diâmetro aumenta à medida que se aproxima da superfície e é mais visível na amostra não pressurizada. [19].

#### **4.5. Tensão residual após a perfuração a laser**

Testes foram realizados nas mesmas condições anteriores, porém para 30 segundos de tempo de irradiação do laser.

Durante esses testes, como o tempo de irradiação era maior, consequentemente o calor fornecido para as amostras era bem maior, dessa forma na maioria dos testes os sensores FBG perdiam sua conexão com o interrogador óptico, pois a fibra simplesmente queimava devido a grande quantidade de calor ou quebrava durante a perfuração em um determinado momento devido as trincas que eram criadas na superfície das amostras, como pode ser observado na Figura 30, e assim não era possível calcular com perfeição a distribuição de tensão.



Figura 30: Amostra evidenciando trincas causadas pela irradiação de 30 segundos de laser

Não foi possível completar nenhum teste de medição de tensão durante 30 segundos de ação do laser, no entanto a distribuição das tensões segue aproximadamente o mesmo perfil observado no tempo de teste de 10 segundos, porém com valores maiores. A diferença mais importante é observada depois de algumas horas, quando os primeiros sinais de fratura aparecem. A Figura 31(a) mostra a amostra logo após 30 segundos de irradiação, e ao lado dela, Figura 31(b), uma foto da mesma amostra após alguns dias em repouso. É evidente que uma alta tensão residual permaneceu na amostra causando fragmentação e rachaduras na superfície, além de seu desprendimento, ou seja, delaminação das camadas superficiais.





Figura 31: a) Amostra rochosa logo após a perfuração a laser de 30 segundos. b) Amostra rochosa após alguns dias em repouso, depois da perfuração a laser de 30 segundos [cedido por Dario P. Prada].

Outro fenômeno evidente da alta tensão residual nas amostras é o descolamento das camadas, chamado de delaminação. Além de criar grandes rachaduras, visto anteriormente, as tensões residuais exercem tanta força que descolam as primeiras camadas das amostras, formando lâminas, como pode ser visto na Figura 32.



Figura 32: Evidência da delaminação na amostra rochosa [cedido por Dario P. Prada].

## 5. Conclusão

Conclui-se que a partir dos sensores de rede de Bragg (FBG) foi possível medir a tensão durante e após a perfuração. Cabendo ressaltar novamente que durante a perfuração, os valores calculados não são exatamente os valores reais de tensão, e sim valores cruzados de temperatura e tensão. Somente após o laser ser desligado que foi possível medir a temperatura e isolar somente os resultados derivados das tensões que estavam sendo exercidas nas amostras. Ou seja, os valores reais de tensão só se mostraram após o desligamento do laser.

Os sensores de rede de Bragg (FBG) se comportaram como uma ótima ferramenta de sensoramento apta a avaliar o comportamento das tensões durante e principalmente após as perfurações. De forma qualitativa os comportamentos permaneceram conforme os esperados. Imediatamente após o laser ser ativado a tensão radial se torna compressiva e a tensão radial tensiva, devido ao grande gradiente de temperatura entre o centro da rocha e região adjacente, onde encontra-se o vaso de pressão.

A heterogeneidade da amostra rochosa se apresenta como um fato desafiador, uma vez que impacta nas medições e os valores medidos não são exatamente conhecidos, além da dificuldade de se medir os perfis de temperatura na perfuração a laser.

A micro tomografia permitiu analisar a perfuração, que possui três estágios distintos: uma região vaporizada, uma região fundida e uma região de fratura. A disponibilidade de lasers cada vez mais potentes permitem à comunidade científica avaliar se a ideia de utilizá-los como ferramentas auxiliares de perfuração é viável ou não. Como visto anteriormente é uma ferramenta já utilizada na chamada perfuração híbrida e seu uso está aumentando em aplicações para uso comercial na indústria do petróleo. Para tanto, a compreensão dos fenômenos físicos como as tensões induzidas estudadas neste trabalho é essencial.

Portanto, esse trabalho de final de curso poderá contribuir como um motivador para trabalhos futuros, relacionados a perfuração a laser e instrumentação de sensores FBG, que irão complementar o mesmo.

## 6. Referências

- [1] IPG Photonics; <https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers>, Acesso em 06/12/2018.
- [2] Foro Energy; <http://www.foroenergy.com/>, Acesso em 25/07/2018.
- [3] D. P. Parra, *Análise numérica e experimental do canhoneio a laser em rochas carbonáticas*, PhD thesis, PUC -Rio, 2016.
- [4] B. M. Olaleye, “A review of light amplification by stimulated emission of radiation in oil and gas well drilling,” *Mining Science and Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 752–757, 2010.
- [5] H. G. da Silva, *Estudos preliminares sobre a aplicação de lasers de alta potência na perfuração de revestimentos de poços*. MSc thesis, PUC-Rio, 2014.
- [6] Solda a laser e com feixe de elétrons, <https://www.ebah.com.br/content/abaaaby-cac/seminario-cores-1>, Acesso em 06/09/2018.
- [7] Benefícios do laser de fibra óptica; <https://wellelaser.com/beneficios-do-laser-de-fibra-optica/>, Acesso em 10/08/2018.
- [8] O que são fibras ópticas?; <https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-sao-fibras-opticas.htm>, Acesso em 06/12/2018.
- [9] Refração da luz: por que a fibra óptica e o arco-íris são “parentes”?; <https://descomplica.com.br/blog/fisica/refracao-da-luz-por-que-a-fibra-optica-e-o-arco-iris-sao-parentes/>, Acesso em 06/12/2018.
- [10] Tipos de cabos de fibra óptica; <https://student.dei.uc.pt/ferro/trav1/trav2.html>, Acesso em 06/12/2018.
- [11] Atenuação e limitações das fibras ópticas; [https://www.gta.ufrj.br/grad/08\\_1/wdm1/Atenuaoelimitaesdasfibraspticas.html](https://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/wdm1/Atenuaoelimitaesdasfibraspticas.html), Acesso em 06/12/2018.
- [12] I. G. Camerini, Qualificação de diferentes procedimentos de instrumentação de sensores de deformação baseados em redes de Bragg. Projeto de Graduação, Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2017.
- [13] B. Culshaw and A. Kersey, “Fiber-Optic Sensing: A Historical Perspective,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, pp. 1064–1078, May 2008.
- [14] Daniel Ramos Louzada, “Detecção e caracterização de danos estruturais através de sensores a rede de Bragg e Redes Neurais Artificiais,” tech. rep., 2013.
- [15] Sully M. M Quintero, *Aplicações de Sensores a Rede de Bragg em Fibras Ópticas na medição de pH e Deformação de Filmes Finos de Alta Dureza*. PhD thesis, PUC-Rio, 2006.
- [16] R. Kashyap, *Fiber Bragg gratings*, Academic Press, 2010.

- [17] Micron Optics Medidor de Fibra Óptica Compacto;  
<http://www.directindustry.com/pt/prod/micron-optics/product-101517-1107355.html>,  
Acesso em 20/07/2018.
- [18] R. R. Archer, S. H. Crandall, N. C. Dahl, T. J. Lardner, and M. S. M. S. Sivakumar, *An introduction to the mechanics of solids (in SI units)*, McGraw Hill, 1978.
- [19] B. C. Gahan and P. E. Samih Batarseh, “Laser Drilling-Drilling with the Power of Light,”  
<https://www.osti.gov/servlets/purl/894903>, 2006, Acesso em 06/12/2018.