

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

DAVI ALMEIDA TOROBAY

**PROTÓTIPO DE SENSOR EM FIBRA COM TECNOLOGIA
FBG PARA MEDIDA DE DEFORMAÇÃO EM MATERIAIS
ROCHOSOS**

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2016

DAVI ALMEIDA TOROBAY

**PROTÓTIPO DE SENSOR EM FIBRA COM TECNOLOGIA FBG
PARA MEDIDA DE DEFORMAÇÃO EM MATERIAIS ROCHOSOS**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Davi Almeida Torobay**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Profa. Dra. Maria José Pontes
Orientadora

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2016

DAVI ALMEIDA TOROBAY

**PROTÓTIPO DE SENSOR EM FIBRA COM TECNOLOGIA FBG
PARA MEDIDA DE DEFORMAÇÃO EM MATERIAIS ROCHOSOS**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Davi Almeida Torobay**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 19, de dezembro de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Profa. Dr^a. Maria José Pontes
UFES
Orientadora

Prof. Dr. Eng. Carlos Eduardo Schmidt
Castellani
UFES
Examinador

Prof. Ms.C. Manuel Ricardo Alfonso
Sánchez
UFES
Examinador

AGRADECIMENTOS

À professora Maria José Pontes por sugerir o tema e incentivar o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Dr. Patrício Pires por disponibilizar seu tempo, seus conhecimentos e o laboratório de mecânica dos sólidos para realização dos experimentos.

Aos técnicos do LEMAC e do LAMES por auxiliarem na realização dos experimentos.

À UFES por buscar sempre a excelência nos serviços à comunidade acadêmica e à sociedade.

Ao engenheiro e doutorando Manuel Ricardo Afonso Sánchez que se dispôs a doar seu tempo para dar suporte às tarefas do projeto.

Ao professor Carlos Eduardo Schmidt Castellani por auxiliar com a parte computacional do trabalho.

RESUMO

Neste trabalho é testado o uso do sensor em fibra óptica baseado em grade de Bragg capaz de monitorar variações de deformação, com um interrogador baseado na técnica do filtro de Fabry-Perot sintonizável, em duas aplicações envolvendo deformação: na instrumentação de um dinamômetro de prensa de cisalhamento direto e no ensaio de compressão axial de corpos de prova de granito. Nesses testes, foi analisada a eficácia do uso do sensor FBG e realizada a comparação com outros métodos. Conclui-se a FBG é aplicável para essas finalidades, com a vantagem de se obter maior sensibilidade na medição de compressão e tração dos objetos instrumentados.

Palavras-chave: Grades de Bragg em Fibras Ópticas (*Fiber Bragg Gratings - FBG*), sensor de deformação, interrogador, compressão axial, geotecnia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de grade de Bragg	20
Figura 2 - Efeito da deformação no comprimento de onda	20
Figura 3 - Gráfico deformação x tensão	23
Figura 4 - Fotografia do granito Prata Imperial	24
Figura 5 - Foto ilustrativa do interrogador óptico modelo sm125-500 da MOI.....	26
Figura 6 - Máquina de fusão de fibra óptica.....	27
Figura 7 - Plotagem da curva de calibração do anel dinamométrico de 500 gf.....	28
Figura 8 - Foto do anel dinamométrico de 500 gf de capacidade	28
Figura 9 - Prensa hidráulica do LEMAC.....	29
Figura 10 - Foto do anel dinamométrico e as FBG's fixadas	30
Figura 11 - Esquemático do experimento.....	31
Figura 12 - Espectros do sinal refletido pela FBG externa em diferentes posições da prensa	32
Figura 13 - Curva de calibração obtida em função da tensão sobre a FBG externa	32
Figura 14 - Espectros do sinal refletido pela FBG interna em diferentes posições da prensa	33
Figura 15 - Curva de calibração obtida em função da compressão sobre a FBG interna	33
Figura 16 - Comparação entre curvas do anel e das FBG's	35
Figura 17 - Amostras preparadas para ensaio	36
Figura 18 - Corpo de prova 1 após o ensaio	37
Figura 19 - Relação entre <i>strain</i> e pressão	39
Figura 20 - Corpo de prova 2 após o ensaio	40
Figura 21 - Relação entre <i>strain</i> e pressão	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre comprimento de onda medido com posição da prensa (fibra externa).....	34
Tabela 2 - Relação entre comprimento de onda medido com posição da prensa (fibra interna).....	34
Tabela 3 - Dados dos corpos de prova ensaiados	36
Tabela 4 - Dados calculados a partir do ensaio	38
Tabela 5 - Dados calculados a partir do ensaio	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FBG	Grades de Bragg em fibras ópticas (acrônimo de sua designação em inglês: <i>Fiber Bragg Gratings</i>)
FFP-TF	Filtro óptico sintonizável de Fabry-Perot em fibra (acrônimo de sua designação em inglês: Fiber Fabry-Perot Tunable Filter)
PZT	Transdutor piezoelétrico
LED	Diodo emissor de luz (acrônimo de sua designação em inglês: <i>Light Emitter Diode</i>)
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
LabTel	Laboratório de Telecomunicações
LEMAC	Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção
LAMES	Laboratório de Mecânica dos Sólidos

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Vetor deslocamento campo elétrico (C/m ²)
ρ_f	Densidade volumétrica de cargas livres no material (C/m ³)
B	Vetor de densidade de fluxo magnético (T)
E	Vetor campo elétrico (V/m)
H	Vetor campo magnético (A/m)
J	Vetor de densidade de corrente (A/m ²)
ϵ	Permissividade elétrica (F/m)
ϵ_0	Permissividade elétrica (F/m)
P_i	Polarização elétrica induzida
μ	Permeabilidade magnética do meio (H/m)
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo (H/m)
M	Polarização magnética induzida
σ_i	Condutividade elétrica do material (S/m)
c	Velocidade de propagação da luz no vácuo (m/s)
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa (F/m)
μ_r	Permeabilidade magnética relativa (H/m)
$X_{ij}^{(1)}$	Susceptibilidade linear
λ	Comprimento de onda

GLOSSÁRIO

EMI interferência eletromagnética.

gf grama força (unidade de força).

mm milímetros (equivale a um milésimo de um metro).

nm nanômetros (unidade de medida de comprimento de onda).

pm picômetros (unidade de medida de variações nos comprimentos de onda).

$\mu\epsilon$ microstrain (equivale a uma deformação 1 μm por cada metro de fibra).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	15
2.1	Teoria da Propagação de Ondas Eletromagnéticas em Fibras Ópticas	16
2.2	Rede de Bragg em Fibra Óptica	19
2.3	Abordagem Matemática da Grade de Bragg.....	21
2.4	Técnicas de Fixação de Fibra Óptica	22
2.5	Deformação de Materiais Rochosos.....	22
2.5.1	Características do Granito.....	24
2.6	Procedimento para Ensaio em Amostras Rochosas	24
3	EXPERIMENTOS	25
3.1	Ferramentas Utilizadas	25
3.1.1	Sistema Interrogador.....	25
3.1.1.1	Interrogador modelo sm125-500 da Micron Optics.....	25
3.1.2	Máquina de Fusão de Fibra Óptica.....	26
3.1.3	Prensa de Cisalhamento e Anel Dinamométrico	27
3.1.4	Prensa Hidráulica.....	29
3.1.5	Software MATLAB	29
4	METODOLOGIA	30
4.1	Sensoriamento em Anel Dinamométrico.....	30
4.1.1	Montagem	30
4.1.2	Resultados experimentais.....	31
4.1.3	Conclusões	35
4.2	Sensoriamento em Ensaio de Rochas	35
4.2.1	Primeiro experimento	36
4.2.1.1	Montagem e resultados experimentais	36
4.2.1.2	Conclusões	39
4.2.2	Segundo experimento	39
4.2.2.1	Montagem e resultados experimentais	39
4.2.2.2	Conclusões.....	41
5	CONCLUSÕES	42
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

Os sensores elétricos precederam os sensores ópticos e a transição entre as duas tecnologias ocorre nos dias de hoje, pois algumas aplicações ainda são mais baratas utilizando *strain gages*, por exemplo.

O sensor de deformação elétrico (*strain gage*) é uma das ferramentas mais importantes na técnica de medição elétrica aplicada à medição de grandezas mecânicas. Como seu próprio nome indica, ele é utilizado para medir a deformação. Tecnicamente, "deformação" pode ser causada por tensionamento e por compressão, diferenciados por um sinal positivo ou negativo. Portanto, os sensores de deformação são utilizados para captar expansão e contração.

A deformação de um corpo é sempre causada por influência externa ou por um efeito interno. A deformação pode ser causada por forças, pressões, momentos, calor, alterações estruturais do material e/ou similares. Se determinadas condições forem atendidas, a quantidade ou o valor da grandeza de influência pode ser derivado a partir do valor de deformação medido. Em análise de tensões, esse recurso é amplamente utilizado. A análise de tensões utiliza os valores de deformação medidos na superfície de uma amostra, ou peça estrutural, para indicar a tensão no material e também prever a sua segurança e resistência.

O primeiro sensor de deformação metálico colado tipo fio foi desenvolvido em 1938. Quando uma carga é aplicada à superfície, a alteração resultante em comprimento da superfície é comunicada ao resistor e a tensão correspondente é medida em termos de resistência elétrica do fio da película, que varia linearmente com a deformação. Ao selecionar o sensor de deformação, além das características de deformação do sensor, devem ser consideradas a estabilidade e sensibilidade em relação à temperatura. Infelizmente, os materiais mais desejados para os sensores de deformação também são sensíveis a variações de temperatura e tendem a sofrer alterações na resistência à medida que envelhecem. (INC.,2017).

A fibra óptica se tornou uma possibilidade no início do século XIX, quando a comunidade acadêmica passou a ter conhecimento sobre o fenômeno da reflexão interna total. Mas foi na segunda metade do século XX que a tecnologia se estabeleceu. Graças a uma crescente demanda por sistemas de transmissão mais eficientes e o desenvolvimento de técnicas de produção em massa, e de melhorias técnicas capazes de minimizar as perdas, a fibra óptica revolucionou as telecomunicações. (UDD; SPILLMAN, 2011).

Com o avanço da tecnologia e a necessidade da integração dos dispositivos eletrônicos e ópticos, a fim de diminuir seu tamanho e aumentar sua confiabilidade e precisão, as técnicas de microeletrônica têm ganhado grande relevância no cenário mundial. Inúmeras técnicas de fabricação de topologias lograram êxitos na obtenção de dispositivos de dimensões cada vez mais reduzidas no decorrer do desenvolvimento tecnológico. (SILVA, 2011).

Ao longo dos últimos 20 anos dois principais segmentos causaram grandes mudanças, o crescimento da optoeletrônica e a indústria de comunicações de fibra óptica. A indústria optoeletrônica trouxe produtos como discos compactos, impressoras à laser, *scanners* de códigos de barras e lasers. A indústria de comunicações via fibra óptica revolucionaram a indústria de telecomunicações com decréscimo de preços da largura de banda. (YIN; RUFFIN; YU, 2008).

Em paralelo com esse desenvolvimento, os sensores baseados em fibra óptica tem sido os principais utilizadores de tecnologia associada aos optoeletrônicos e indústria de fibras ópticas. Muitos componentes dessas indústrias foram desenvolvidos para aplicações de sensores em fibra óptica. (YIN; RUFFIN; YU, 2008).

Sensor em fibra baseado em grade de Bragg tem muitas vantagens sobre os sensores elétricos. É um sensor barato de produzir, simples, imune à interferência eletromagnética, leve, pequeno e de resposta linear. Sua capacidade de multiplexação de comprimento de onda permite que existam várias grades em um único pedaço de fibra de modo a formar um *bus* de dados de rede óptica.

O desenvolvimento de sensores de fibra óptica integrados estruturalmente, utilizando redes de Bragg, representa uma contribuição importante para a evolução de estruturas inteligentes, levando a melhorias na segurança e na economia em diversos campos da engenharia, incluindo grandes obras de construção civil, pontes rodoviárias e ferroviárias, túneis, barragens, estruturas marítimas e numerosos aparelhos médicos. (YIN; RUFFIN; YU, 2008).

O uso de fibras ópticas na aeronáutica e em infraestruturas civis é prevalente, e existem muitas aplicações que foram publicadas. Apesar do uso comum de sensores ópticos para monitoramento da saúde de estruturas aeronáuticas e civis, há menos exemplos de aplicação em geotecnia e geofísica. (KANOPOULOS, 2014).

Geoengenharia precisa de informação precisa e confiável sobre o stress, tensão e temperatura em seus estados, taxas e gradientes tanto em campo, quanto em laboratório. Para o ambiente hostil no monitoramento geotécnico as grandes vantagens dos sensores de fibra óptica podem ser exploradas. Devido ao seu tamanho compacto, sensores de fibra óptica podem ser

concebidos como sistemas estruturalmente integrados (sensores inteligentes). A imunidade à EMI, a resistência à ambientes corrosivos, a alta precisão e confiabilidade e a possibilidade de utilizar vários comprimentos de onda numa só fibra os torna a melhor escolha para aplicações geotécnicas. (SCHMIDT-HATTENBERGER; NAUMANN; BORM, 2003).

Sensores de fibra óptica tem sido relatados em monitoramento de deformação de rochas, túneis e em medições de fundo de poço. Neste trabalho, descreve-se a viabilidade de aplicação de um sensor FBG em testes mecânicos numa rocha.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Ao interagir com a matéria, a luz pode ter suas propriedades modificadas ao ser transmitida, refletida ou espalhada. Com base na premissa de que as propriedades da matéria influenciam na forma como a luz vai se comportar após a interação, sensores ópticos vem sendo desenvolvidos com objetivo de quantificar diversas propriedades físicas, tais como: pressão, temperatura, distância, vibração, deformação, rugosidade e até mesmo composição química de fluidos.

Os sensores de fibra óptica com grade de Bragg (FBG, do inglês *Fiber Bragg Grating*) são construídos explorando a característica de fotossensibilidade das fibras ópticas, descoberto por Hill. Sabe-se que o processo de mudança do índice de refração depende das características do material de construção da fibra, da intensidade e do comprimento de onda da luz da fonte óptica de exposição ultravioleta e de alguns processos de preparação da amostra. (SILVA, 2011).

Grades de Bragg ou redes de Bragg são estruturas ópticas caracterizadas pela perturbação periódica no seu índice de refração. Isto é feito de tal forma que, dependendo do padrão de variação, esta estrutura reflete parte do espectro centrado em um determinado comprimento de onda conhecido como comprimento de onda de Bragg, que é a condição de ressonância da grade.

Grades de Bragg inscritas em fibra óptica (FBGs) são as mesmas estruturas ópticas citadas anteriormente, mas, gravadas ao longo de um pequeno segmento de fibra óptica. Assim, a luz incidente na fibra quando possui modos de comprimento de onda iguais ou vizinhos ao comprimento de onda de Bragg tem seu espectro parcialmente refletido. (FERREIRA, 2011).

Os modelos mais conhecidos e que apresentam melhores resultados em relação ao processo de mudança do índice de refração em fibras ópticas são os seguintes: modelos dos centros de cor, modelo dos dipolos, modelo da compactação ou densificação e modelo de alívio de tensão. Entretanto, as técnicas de melhoria de fotossensibilidade em fibras se mostraram mais eficientes, já que resultam grades de Bragg mais precisas, estáveis e com elevada refletividade. Dentre as técnicas mais comuns utilizadas para o incremento da fotossensibilidade estão os processos de hidrogenação, o de co-dopagem e o de varredura à chama. (SILVA, 2011).

2.1 Teoria da Propagação de Ondas Eletromagnéticas em Fibras Ópticas

A propagação de onda magnética guiada pela fibra óptica pode ser analisada através das equações de Maxwell considerando a geometria cilíndrica da fibra com condições de contorno apropriadas, tais como diâmetro do núcleo, comprimento de onda, abertura numérica, etc.

As equações de Maxwell na sua forma diferencial, para materiais lineares, homogêneos, isotrópicos, sem perdas e livres de cargas, são as apresentadas a seguir:

$$\nabla \cdot D = \rho_f \quad (2.1.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.1.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1.3)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.1.4)$$

onde:

D é o vetor deslocamento campo elétrico ou densidade de fluxo elétrico;

E é o vetor campo elétrico;

B é o vetor de densidade de fluxo magnético;

H é o vetor campo magnético;

J é o vetor de densidade de corrente;

ρ_f é a densidade volumétrica de cargas livres no material.

As equações (2.1.1) e (2.1.2) representam, respectivamente, as Leis de Gauss para a eletricidade e para o magnetismo, a Equação (2.1.3) a Lei de indução de Faraday e a Equação (2.1.4) representa a Lei de Ampère-Maxwell.

Em materiais lineares as densidades de fluxo D e B , e a densidade de corrente J , estão relacionadas com os campos E e H através das seguintes equações constitutivas:

$$D = \varepsilon \cdot E = \varepsilon_0 \cdot E + P_i \quad (2.1.5)$$

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot (H + M) \quad (2.1.6)$$

$$J = \sigma_i \cdot E \quad (2.1.7)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \quad (2.1.8)$$

Onde: ε_0 é a permissividade elétrica e μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo onde ambas são grandezas escalares, ε é a permissividade elétrica e μ a permeabilidade magnética do meio, P_i é a polarização elétrica induzida, M é a polarização magnética induzida, σ_i é a condutividade elétrica do material e c é a velocidade de propagação de luz no vácuo.

E que:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (2.1.9)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.1.10)$$

onde: ε_r é a permissividade elétrica e μ_r a permeabilidade magnética relativas.

Para um meio dielétrico, homogêneo e não condutor como caso das fibras ópticas de sílica, admite-se que não existam cargas livres no material, assim: $\rho_f = 0$, que por ser um material não condutor não há circulação de corrente, assim: $\sigma_i = 0$ e, portanto $J = 0$ e que pela ausência de materiais ferromagnéticos, $M = 0$.

Portanto tem-se que:

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (2.1.11)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.1.12)$$

Sabe-se que a polarização induzida ou densidade de polarização pode ser expressa por:

$$P_i = \varepsilon_0 X_{ij}^{(1)} E \quad (2.1.13)$$

Onde $X_{ij}^{(1)}$ é a susceptibilidade linear, ou seja, de ordem 1. A susceptibilidade é parâmetro que indica quão facilmente o material dielétrico se polariza em resposta a um campo elétrico aplicado e está relacionado com a permissividade relativa através da expressão:

$$\varepsilon_0 = 1 + X_{ij}^{(1)} \quad (2.1.14)$$

Usando a segunda forma da Equação (2.1.5) na Equação (2.1.12), tem-se:

$$\nabla \times H = \frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon_0 \cdot E + P_i] \quad (2.1.15)$$

Aplicando-se o operador rotacional em ambos os lados da Equação (2.1.3) e substituindo a primeira forma da Equação (2.1.6) na Equação (2.1.12), tem-se:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\nabla \times \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times B) = -\mu \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times H) = -\mu \cdot \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} \quad (2.1.16)$$

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla (\nabla \cdot E) - \nabla^2 \cdot E \quad (2.1.17)$$

Vetor identidade de Lagrange

Utilizando o vetor identidade (2.1.17), a Equação (2.1.11) e a derivada no tempo da Equação (2.1.15) na Equação (2.1.16) é possível obter, a partir das equações diferenciais de primeira ordem de Maxwell a equação de onda de segunda ordem que descreve a propagação do campo elétrico no meio:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\mu \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu \cdot \frac{\partial^2 P_i}{\partial t^2}$$

ou

(2.1.18)

$$\nabla^2 E = \mu \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 P_i}{\partial t^2}$$

Utilizando as Equações (2.1.13) e (2.1.14) em (2.1.18) pode-se chegar à equação da onda na seguinte forma:

$$\nabla^2 E = \mu \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} [1 + X_{ij}^{(1)}] \cdot E \quad (2.1.19)$$

Ou como:

$$\nabla^2 E = \mu \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ij} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.1.20)$$

Similarmente, pode-se encontrar uma equação de onda que descreva a propagação do campo magnético no meio.

2.2 Rede de Bragg em Fibra Óptica

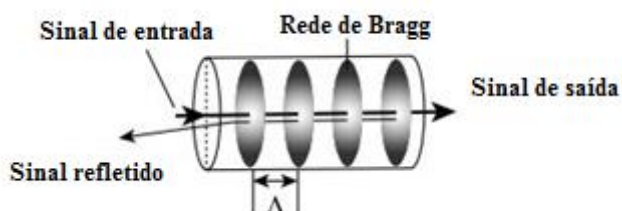
Pode-se dizer de uma forma bem sucinta, que uma grade de Bragg em fibra óptica consiste em uma modulação periódica ou quase periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra monomodo ao longo do eixo longitudinal, coincidente com o eixo z .

O sensoriamento em uma FBG advém da sensibilidade do índice de refração e o período da grade de Bragg ao ser aplicada uma perturbação mecânica ou térmica. A deformação afeta a resposta na FBG diretamente, através da compressão ou expansão da fibra. A rede de Bragg atua como um filtro específico a certos comprimentos de onda, refletindo-os e transmitindo o restante do espectro da luz incidente. Fundamentalmente, seu funcionamento é baseado na lei de reflexão de Fresnel, uma vez que são constituídas de pequenas alterações periódicas no índice de refração do núcleo da fibra, causando pequenas reflexões da luz que atravessa essa estrutura. Sabe-se que quando uma onda eletromagnética é refratada pela interface entre dois meios materiais dielétricos de índices de refração diferentes, parte dessa onda é refletida e a outra parte é transmitida. (OLIVEIRA, 2012)

Na figura 1 é apresentado o esquemático de uma grade de Bragg em fibra óptica, em que é esboçado o efeito da deformação relacionado ao comprimento de onda. O sinal de entrada se propaga na fibra e à medida que encontra a rede de Bragg gravada, parte da luz é transmitida e outra parte é refletida. A luz refletida é medida e permite o sensoriamento da região

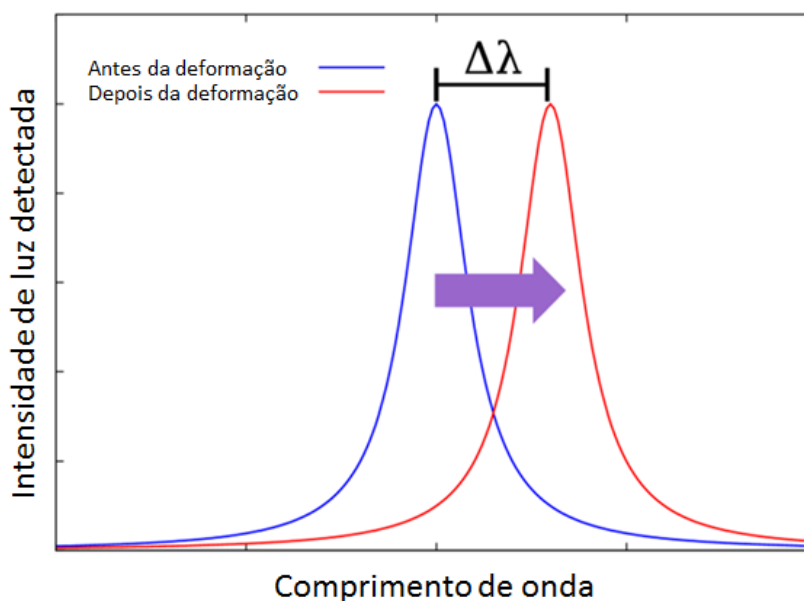
mensurada. O período de gravação (Λ) da rede pode ser alterado na gravação e define a resposta do sensor.

Figura 1 - Esquema de grade de Bragg



Fonte: próprio autor.

Figura 2 - Efeito da deformação no comprimento de onda



Fonte: próprio autor.

As características de uma FBG são influenciadas não só pelo padrão de gravação do índice de refração efetivo da mesma como pelos materiais fotossensíveis e demais dopantes da sílica adicionados à fibra onde será inscrita a grade. Por características de fabricação de uma FBG, entenda-se uma série de parâmetros intrínsecos a mesma, tais como: refletividade, a largura de banda do espectro refletido, o índice de refração efetivo, o período e o índice de modulação da grade. (FERREIRA, 2011).

Além disso, certas características mecânicas também são determinadas pelo método de fabricação tais como: ponto de fusão, força aplicada e deformação correspondente (razão de

Poisson), constante elástica da fibra, dentre outros. Tais características determinam a aplicabilidade da grade em fibra resultante. (FERREIRA, 2011).

Grades de Bragg são estruturas que podem ser inscritas em fibra óptica a partir da incidência de luz ultravioleta. Tipicamente, a forma de gravação das grades em fibra envolve dois métodos amplamente utilizados: o interferométrico e o que faz uso de máscaras de gravação. (FERREIRA, 2011).

2.3 Abordagem Matemática da Grade de Bragg

A refletividade da grade de Bragg é dada pelo módulo quadrático da expressão do coeficiente de reflexão, ou seja:

$$R(L, \lambda) = |r|^2 = \frac{k^2 \cdot \sinh^2(qL)}{\sigma_j^2 \cdot \sinh^2(qL) + q^2 \cdot \cosh^2(qL)} \quad (2.3.1)$$

onde σ_j é a quantificação da grandeza da sintonia ou coeficiente de auto acoplamento, q é a relação de dispersão, k é coeficiente de acoplamento AC dado pela equação 2.3.3 e Λ é a amplitude de modulação da grade.

$$q = \sqrt{k^2 - \sigma_j^2} \quad (2.3.2)$$

$$k = \frac{1}{2} \Lambda \beta \quad (2.3.3)$$

O número de onda tem dependência com o comprimento de onda, através da seguinte relação:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2.3.4)$$

E a quantificação da grandeza da sintonia é dada por:

$$\sigma_j = n_{ef} \beta - \frac{\pi}{\Lambda} \quad (2.3.5)$$

Onde n_{ef} é o índice de refração efetivo da fibra e Λ é o período da grade, função da deformação.

2.4 Técnicas de Fixação de Fibra Óptica

A instalação da FBG na superfície a ser instrumentada é fundamental para que os resultados coletados sejam coerentes e fiéis com a deformação mecânica produzida.

Como visto em SCHMIDT-HATTENBERGER, et. al, a técnica mais comum para fixação de FBG em superfícies é a resina de epoxy por sua ótima adesão ao material ensaiado, com a desvantagem de ter a FBG sacrificada após o ensaio. A outra técnica sugerida no mesmo artigo é a fixação utilizando phenylsalicylate (salol), que tem a facilidade de se liquefazer a temperatura de 40° C, possibilitando a reutilização da FBG. Porém o uso do salol é recomendado apenas com o pré-tensionamento das grades de Bragg.

Nesse trabalho, utilizou-se o cianoacrilato que tem fixação adequada comparada às outras técnicas e ainda possibilita a sua dissolução em acetona, possibilitando dessa forma, a reutilização da FBG em outros ensaios.

2.5 Deformação de Materiais Rochosos

Para determinar a resistência de um material, é necessário realizar teste de tração ou compressão. Esse teste é feito com um corpo-de-prova do material com formato e tamanho padronizados.

Medem-se a área de seção transversal inicial A_0 e o comprimento de referência inicial L_0 . O registro do alongamento do corpo-de-prova pode ser feito através de extensômetro ou *strain-gage*.

Com os dados do teste de tração e compressão, podem-se calcular diversos valores de tensão e a deformação correspondente no corpo-de-prova e, depois, construir um gráfico com os resultados.

Diagrama de tensão-deformação convencional: com os dados registrados, determina-se a tensão nominal dividindo a carga aplicada P pela área da seção transversal inicial do corpo de prova A_0 . Esse cálculo pressupõe que a tensão seja constante na seção transversal. Tem-se então:

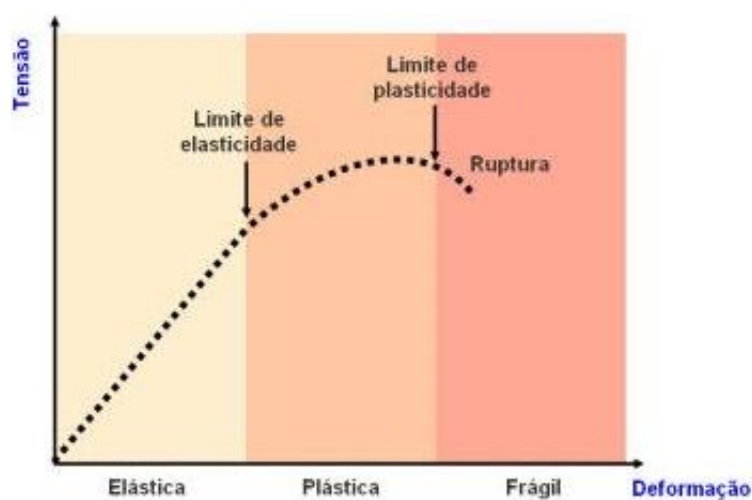
$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.5.1)$$

Da mesma forma, a deformação nominal é encontrada diretamente pela leitura do extensômetro, ou dividindo-se a variação no comprimento de referência, δ , pelo comprimento de referência inicial L_0 . Assim,

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.5.2)$$

Se os valores correspondentes de σ e ϵ forem colocados em um gráfico, no qual a ordenada seja a tensão e a abscissa seja a deformação, a curva resultante será chamada diagrama tensão-deformação convencional. Esse diagrama, como ilustrado na figura 3, é muito importante em engenharia, pois permite obter dados sobre a resistência à tração (ou compressão) do material sem considerar o tamanho ou formato físico desse material, isto é, sua geometria. Entenda-se, no entanto, que dois diagramas tensão-deformação do mesmo material não serão exatamente iguais, uma vez que os resultados dependem de variáveis tais como composição do material, imperfeições microscópicas, a maneira como ele foi fabricado, a taxa de carga e a temperatura durante o período de teste. (HIBBELER, 2004).

Figura 3 - Gráfico deformação x tensão



Fonte: Site educacional¹.

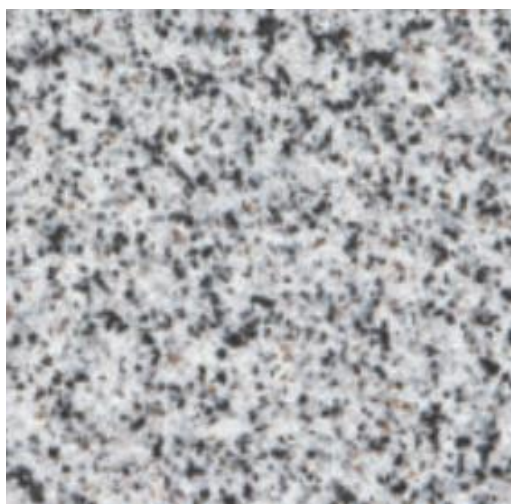
¹ Disponível em: <http://rita.webnode.com/products/processos-e-materiais-geologicos-importantes-em-ambientes-terrestres/>. Acesso em fev. 2017.

2.5.1 Características do Granito

O granito é quase sempre sólido (sem estrutura internas), duro e resistente, sendo por essas qualidades, usado como pedra para construção civil. A densidade média do granito situa-se entre 2,65 e 2,75 g/cm³ (KUMAGAI, Naoiti et al., 1986) e é normalmente encontrado nas placas continentais da crosta terrestre.

A rocha utilizada nos ensaios do trabalho é classificada como monzogranito (Prata Imperial), um tipo comum de rocha ígnea, composta essencialmente pelos minerais: plagioclásio (40%), microclina (24%), quartzo (17%), biotita (12%), opacos (5%) e titânia (2%) (ALENCAR, 2013). Na figura 4, é apresentada uma fotografia ilustrativa do granito Prata Imperial:

Figura 4 - Fotografia do granito Prata Imperial



Fonte: ALENCAR (2013).

Durante o ensaio de compressão simples axial, aparecem deformações elásticas e plásticas. De acordo com ALENCAR, o granito Prata Imperial resiste à compressão axial de até 127,70 MPa. As amostras foram extraídas na região do município de Vitória/ES.

2.6 Procedimento para Ensaio em Amostras Rochosas

Os ensaios em rocha seguiram as diretrizes da norma ASTM D 7012 (AMERICAN...,2010) que indica a relação entre altura e diâmetro dos corpos de prova, que devem estar entre 2:1 e 2,5:1.

3 EXPERIMENTOS

3.1 Ferramentas Utilizadas

Nesta seção faz-se um breve relato sobre as ferramentas utilizadas na montagem, caracterização dos sensores de deformação e nos ensaios, com o intuito de melhor ilustrar o trabalho desenvolvido.

3.1.1 Sistema Interrogador

Com o intuito de realizar o levantamento dos parâmetros ópticos e verificar o comportamento das FBG's utilizadas nos experimentos realizados, fez-se o uso de um dispositivo de medição comercial de modelo sm125 fabricado pela empresa Micron Optics.

3.1.1.1 Interrogador modelo sm125-500 da Micron Optics

O modelo sm125-500 possui quatro canais de entrada, taxa de aquisição de 2 Hz e precisão de 1,0 pm. Esse sistema opera emitindo radiação produzida por um laser sintonizável que varre o comprimento de onda da luz injetada na fibra óptica na faixa de 1510 nm a 1590 nm e tem seu funcionamento baseado na tecnologia proprietária de filtro óptico sintonizável de Fabry-Perot em fibra (FFP-TF). Este método se divide em duas maneiras diferentes de interrogação - sistema operando em malha fechada, tendo por característica principal a de aplicação a uma única FBG; e o modo varredura, o qual se aplica a mais de uma FBG simultaneamente.

O primeiro modo, o de malha fechada, é baseado numa fonte de luz banda larga que incide sobre a FBG que reflete em seu comprimento de onda de Bragg. A luz refletida passa por um filtro de fibra de Fabry-Perot (FFP, do inglês *Fiber Fabry-Perot*) sintonizável, com largura de banda próxima à da FBG. Ao seu sistema, é introduzido um sinal de *dither* de frequência f_d , que faz com que o comprimento da cavidade ressonante se altere, modificando, conseqüentemente, a banda de passagem do FFP. Esse processo é realizado até que haja coincidência entre os espectros do FFP e da FBG, anulando a amplitude do sinal fundamental. Ocorrendo variações no comprimento de Bragg da rede em questão, o sistema altera o espectro do FFP para que siga a variação da FBG. Com isso, é gerado um sinal de erro que contém a informação sobre o deslocamento do comprimento de Bragg. Por seu funcionamento ser desta forma, sua aplicação é limitada a apenas uma única FBG, o que impossibilita sua

implementação em projetos mais elaborados onde se necessita do monitoramento de diversas redes de Bragg simultaneamente.

Entretanto, pode-se estender o uso desse método de interrogação utilizando o modo de varredura. Para isso, substitui-se o sinal aplicado FFP, que passa a ter forma triangular com *dither*, sendo que o sinal de *dither* é senoidal e de baixa amplitude. A variação da deformação aplicada nessa forma triangular ao PZT (transdutor piezoelétrico) que controla o comprimento da cavidade garante que a banda de passagem do FFP coincida com o espectro de reflexão de cada FBG, trabalhando o sistema da mesma forma que descrito anteriormente, mas agora para várias FBGs (OLIVEIRA, 2012).

Na figura 5, é apresentada uma foto ilustrativa do sistema interrogador óptico modelo sm125 da MOI:

Figura 5 - Foto ilustrativa do interrogador óptico modelo sm125-500 da MOI



Fonte: Foto retirada do manual do equipamento.

Enlight é o programa padrão fornecido pelo fabricante MOI para que seja realizada a programação, o controle e a operação dos interrogadores ópticos de sua fabricação, inclusive o modelo sm125 utilizado. Esse programa foi utilizado nas aquisições de sinais das FBG.

3.1.2 Máquina de Fusão de Fibra Óptica

A máquina de fusão de fibra óptica Sumitomo Electric Type-39 foi utilizada no trabalho em todas as emendas necessárias. A máquina aceita apenas fibras de vidro de sílica com

diâmetros externos de 100 a 1000 μ m e diâmetros internos de 80 a 150 μ m. Na figura 6, é apresentada uma foto ilustrativa da máquina de fusão:

Figura 6 - Máquina de fusão de fibra óptica



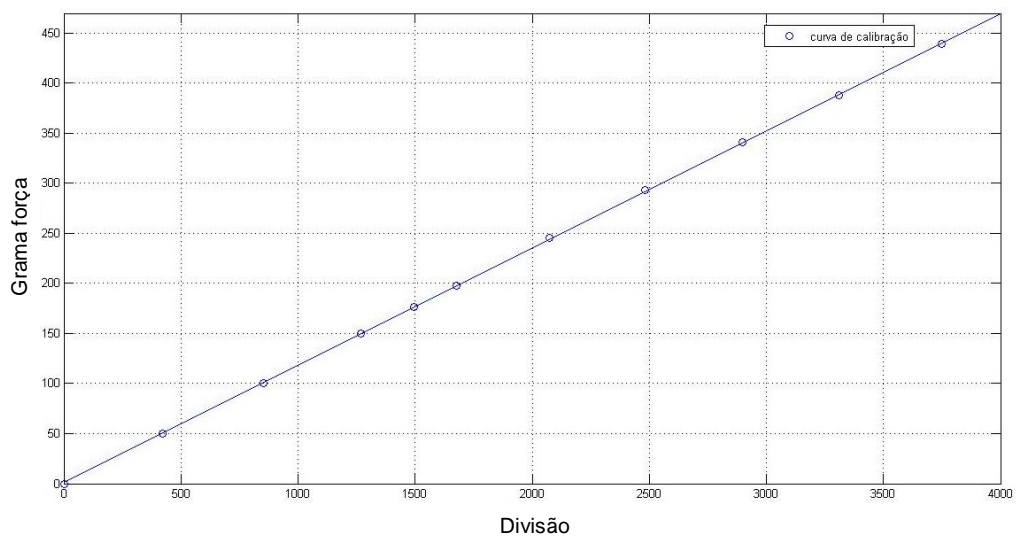
Fonte: Foto retirada do manual do equipamento.

3.1.3 Prensa de Cisalhamento e Anel Dinamométrico

A prensa de cisalhamento direto produzida pelo Ronald Top S/A é utilizada em vários laboratórios brasileiros e apresenta funcionamento confiável. Ela se encontrava nas dependências do LAMES.

O anel integra parte da prensa mecânica da marca Ronald Top S/A e serve como balizador durante experiências de cisalhamento direto, de tal forma que cada variação no deslocamento do dinamômetro integrado ao anel, equivale à determinada pressão em gf. O anel utilizado tem uma constante de 0,123 gf/div e capacidade de suportar até 500 gf. A prensa utilizada tem a curva de calibração mostrada na figura 7:

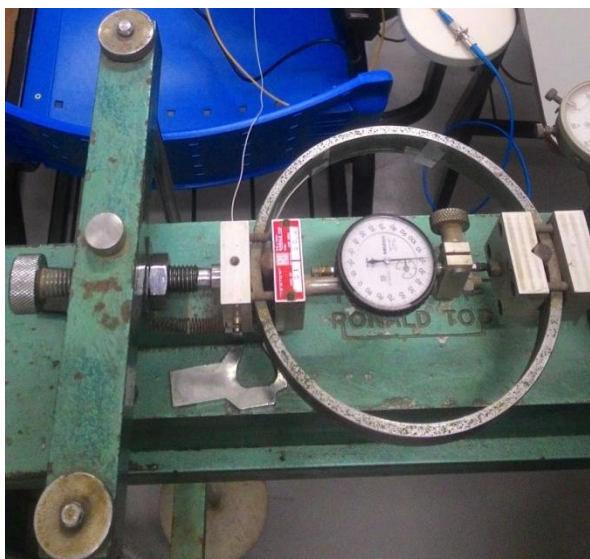
Figura 7 - Plotagem da curva de calibração do anel dinamométrico de 500 gf



Fonte: caracterização fornecida pelo prof. Patrício Pires

O anel dinamométrico com capacidade para suportar até 500 gf, utilizado no trabalho, é mostrado na figura 8, ele tem a função de relacionar o deslocamento do corpo de prova com a carga aplicada:

Figura 8 - Foto do anel dinamométrico de 500 gf de capacidade

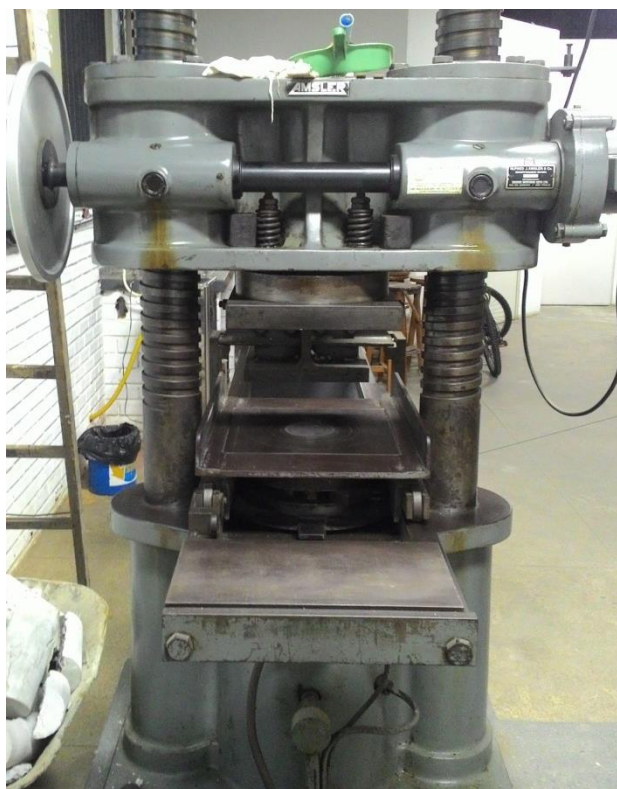


Fonte: próprio autor

3.1.4 Prensa Hidráulica

A prensa hidráulica do fabricante Amsler é localizada no LEMAC e foi utilizada no ensaio de compressão axial. Com capacidade de exercer até 50 toneladas, ela atendeu às necessidades do trabalho desenvolvido. Na figura 9, é apresentada uma foto ilustrativa da prensa hidráulica.

Figura 9 - Prensa hidráulica do LEMAC



3.1.5 Software MATLAB

O software **MATLAB** integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional.

Esse software foi utilizado com o objetivo de processar os sinais gerados pelo interrogador e também para plotar as curvas pertinentes para o trabalho.

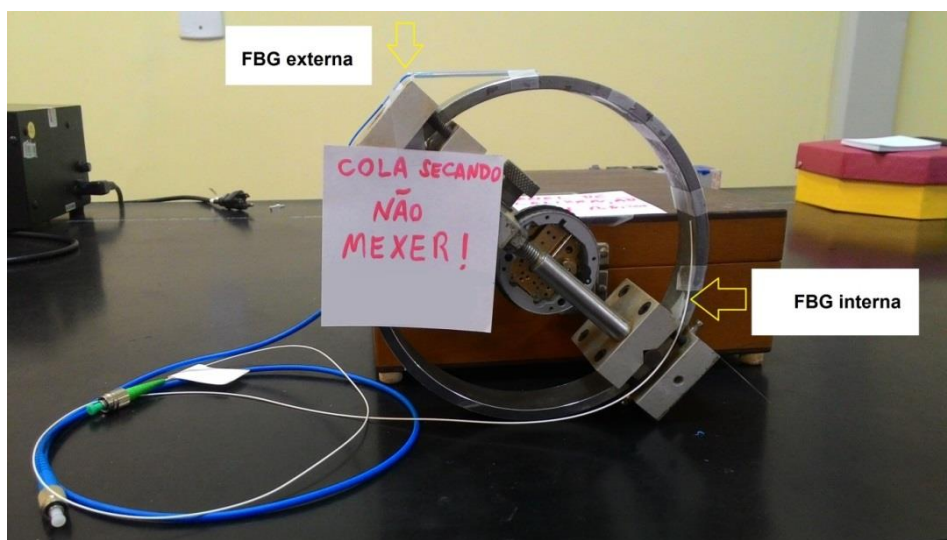
4 METODOLOGIA

4.1 Sensoriamento em Anel Dinamométrico

4.1.1 Montagem

O primeiro experimento consistiu na aplicação de duas FBG's em anel dinamométrico, sendo uma das FBG's fixadas no interior do anel e a outra no exterior, com a intenção de sensoriar a compressão e a distensão do anel, como ilustrado na figura 10:

Figura 10 - Foto do anel dinamométrico e as FBG's fixadas

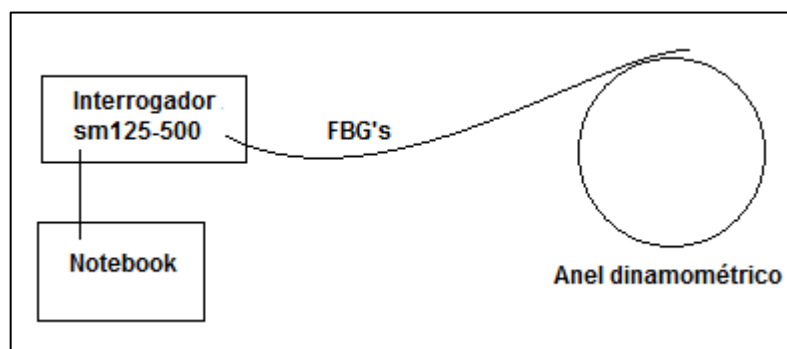


Fonte: próprio autor.

Para a fixação das fibras utilizou-se cola instantânea, feita à base de cianoacrilato, em dois pontos da fibra.

As duas fibras foram conectadas nos canais 1 e 2 do interrogador modelo sm125 da MOI e um computador coletava os dados, de acordo com a figura 11:

Figura 11 - Esquemático do experimento



Fonte: próprio autor.

No canal 1 conectou-se a fibra fixada externamente ao anel dinamométrico, sensoriando a distensão do anel. Já no canal 2 conectou-se a fibra interna ao anel, sensoriando a compressão do anel.

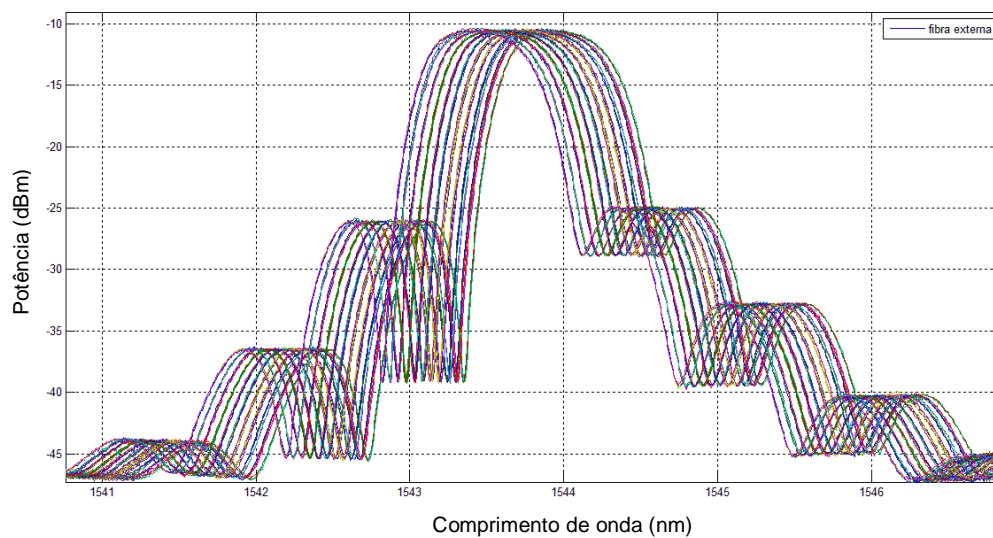
O experimento se baseou na variação manual da prensa de 0 mm a 2 mm, com passos de 0,2 mm. A cada variação, os sinais captados no interrogador eram salvos no computador. Foram retiradas ao menos três amostras de cada posição da prensa.

A temperatura da sala foi mantida estável ao longo do experimento.

4.1.2 Resultados experimentais

Levantaram-se em computador as curvas referentes aos dados obtidos no experimento, com intuito de possibilitar a análise dos fenômenos. As linearizações realizadas em algumas plotagens foram calculadas utilizando a função *lsline* no MATLAB que se baseia no método de estimação por mínimos quadrados. Considerou-se que a sensibilidade da fibra óptica era de 1,15 pm/ $\mu\epsilon$. Nas figuras 12 e 14, apresentam-se os espectros refletidos em cada fibra fixada no anel.

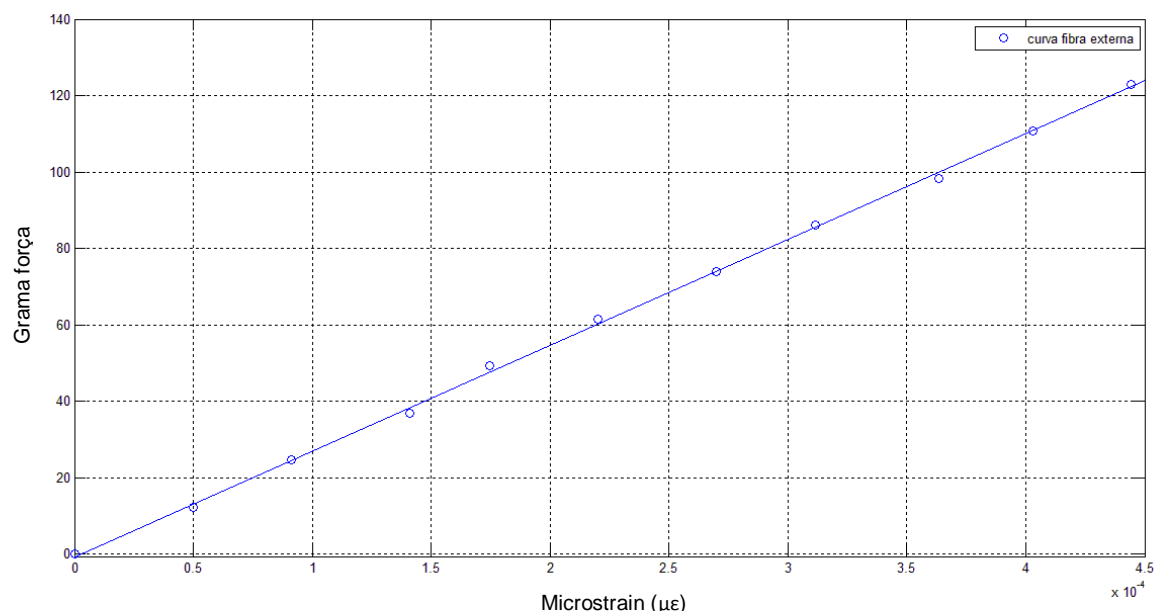
Figura 12 - Espectros do sinal refletido pela FBG externa em diferentes posições da prensa



Fonte: próprio autor.

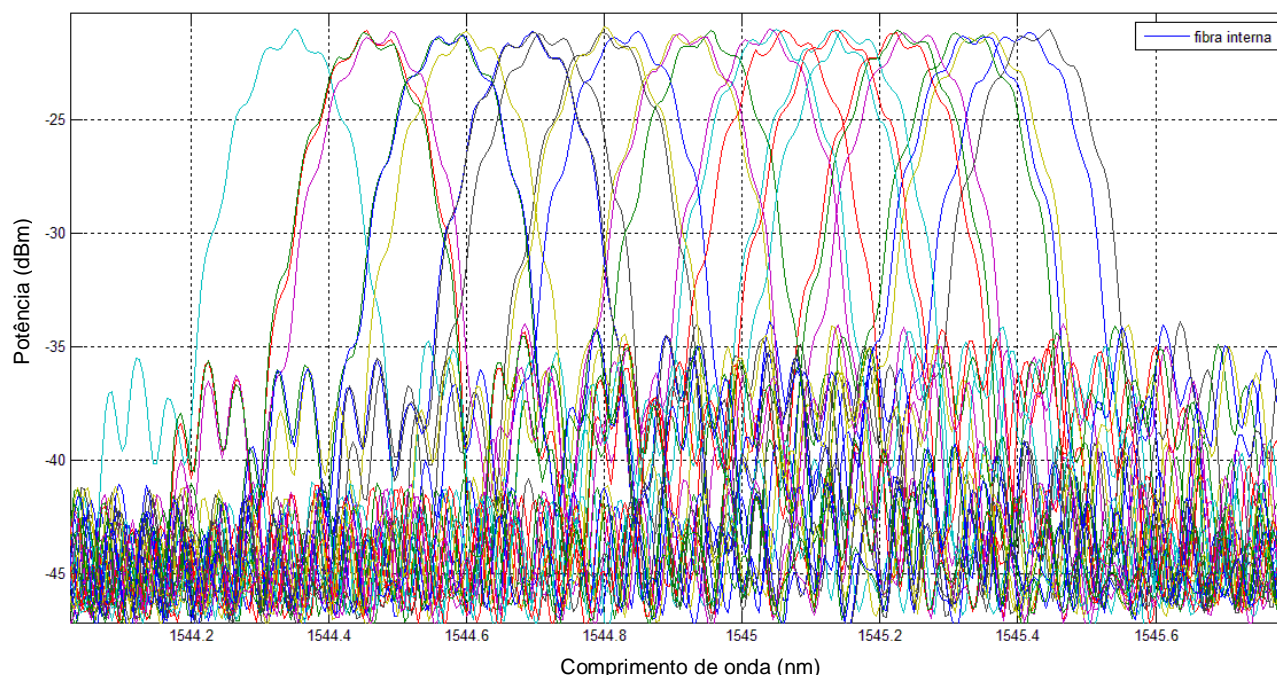
A aproximação linear através dos dados coletados é mostrada na figura 32 pela linha cheia, enquanto os resultados experimentais são representados por pontos.

Figura 13 - Curva de calibração obtida em função da tensão sobre a FBG externa



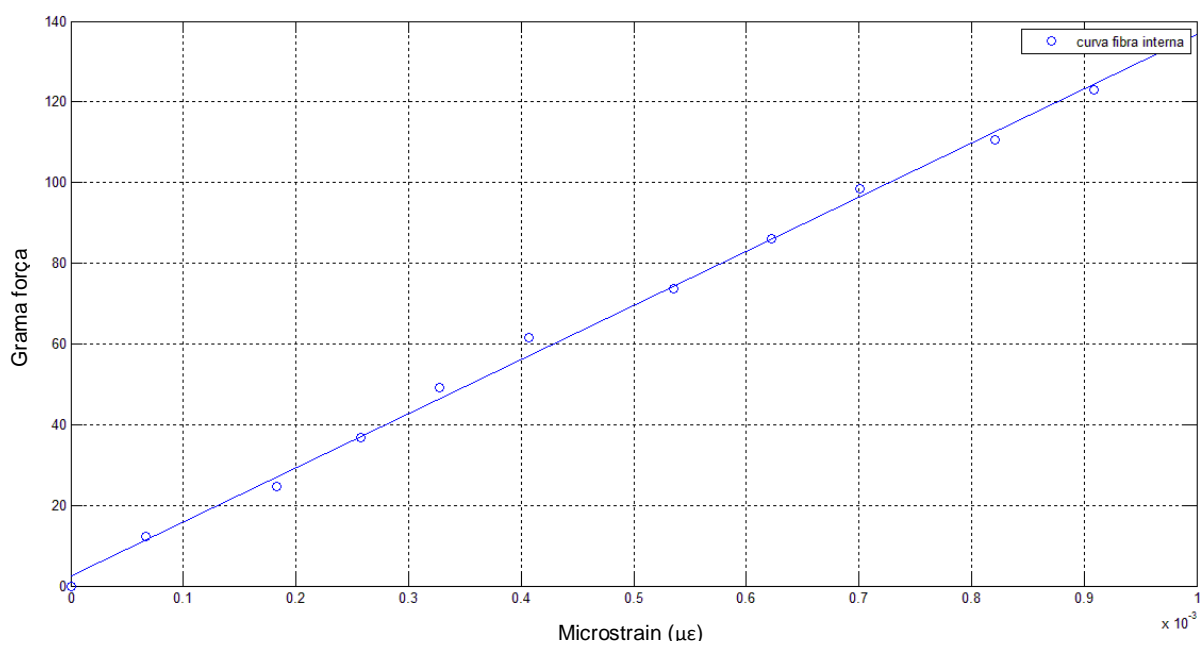
Fonte: próprio autor.

Figura 14 - Espectros do sinal refletido pela FBG interna em diferentes posições da prensa



A aproximação linear através dos dados coletados é mostrada na figura 15 pela linha cheia, enquanto os resultados experimentais são representados por pontos.

Figura 15 - Curva de calibração obtida em função da compressão sobre a FBG interna



As curvas de calibração obtidas relacionam a variação em *strain* com a força correspondente, em grama-força, que a prensa aplica no corpo de prova ensaiado, possibilitando assim, uma forma auxiliar e mais precisa de sensoriamento do anel dinamométrico.

Observou-se que a fibra interna teve um espectro mais disforme que a fibra externa, o que pode ser explicado pelo próprio processo de fabricação da FBG, onde cada grade pode ter um aspecto próprio.

A Tabela 1 mostra os dados coletados e os relacionam com as variações de posição da prensa.

Tabela 1 - Relação entre comprimento de onda medido com posição da prensa (fibra externa)

Δ anel (mm)	MPa	$\Delta\lambda$	λ central (nm)	1- α	$\Delta\epsilon$ calculado	ΔL (pm)	λ medido (nm)
0	0	0	1543.465	0.78	0	0	1543.465
0.2	0.856393	0.060	1543.465	0.78	4.9838E-05	5.98055E-11	1543.405
0.4	1.712787	0.110	1543.465	0.78	9.137E-05	1.09643E-10	1543.355
0.6	2.56918	0.170	1543.465	0.78	0.00014121	1.69449E-10	1543.295
0.8	3.425573	0.210	1543.465	0.78	0.00017443	2.09319E-10	1543.255
1	4.281967	0.265	1543.465	0.78	0.00022012	2.64141E-10	1543.200
1.2	5.13836	0.325	1543.465	0.78	0.00026996	3.23946E-10	1543.140
1.4	5.994753	0.375	1543.465	0.78	0.00031149	3.73784E-10	1543.090
1.6	6.851147	0.437	1543.465	0.78	0.00036325	4.35905E-10	1543.028
1.8	7.70754	0.485	1543.465	0.78	0.00040286	4.83428E-10	1542.980
2	8.563933	0.535	1543.465	0.78	0.00044439	5.33266E-10	1542.930

Fonte: próprio autor.

A Tabela 2 mostra os dados coletados e os relacionam com as variações de posição da prensa.

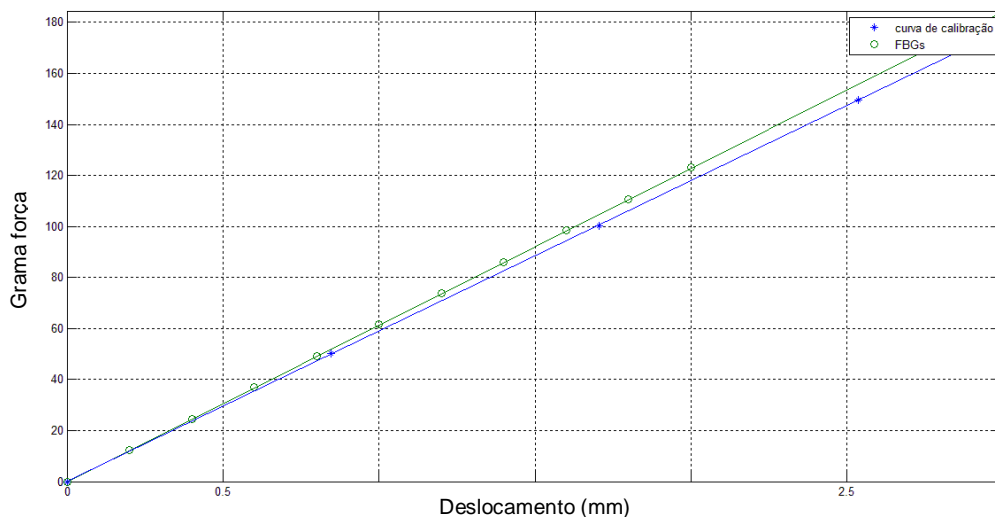
Tabela 2 - Relação entre comprimento de onda medido com posição da prensa (fibra interna)

Δ anel (mm)	MPa	$\Delta\lambda$	λ central (nm)	1- α	$\Delta\epsilon$ calculado	ΔL (pm)	λ medido (nm)
0	0	0	1545.445	0.78	0	0	1545.445
0.2	0.856393	0.080	1545.445	0.78	6.6365E-05	7.96385E-11	1545.365
0.4	1.712787	0.220	1545.445	0.78	0.0001825	2.19006E-10	1545.225
0.6	2.56918	0.310	1545.445	0.78	0.00025717	3.08599E-10	1545.135
0.8	3.425573	0.395	1545.445	0.78	0.00032768	3.93215E-10	1545.050
1	4.281967	0.490	1545.445	0.78	0.00040649	4.87786E-10	1544.955
1.2	5.13836	0.645	1545.445	0.78	0.00053507	6.42085E-10	1544.800
1.4	5.994753	0.750	1545.445	0.78	0.00062218	7.46611E-10	1544.695
1.6	6.851147	0.845	1545.445	0.78	0.00070098	8.41182E-10	1544.600
1.8	7.70754	0.990	1545.445	0.78	0.00082127	9.85526E-10	1544.455
2	8.563933	1.095	1545.445	0.78	0.00090838	1.09005E-09	1544.350

Fonte: próprio autor.

A figura 16 relaciona a curva de calibração (figura 6) com as correspondentes relações de variação do comprimento da fibra com a força aplicada no anel.

Figura 16 - Comparação entre curvas do anel e das FBG's



Fonte: próprio autor.

4.1.3 Conclusões

A instrumentação do anel dinamométrico mostrou que é possível utilizar a FBG para essa aplicação, principalmente, pela melhoria que um sensor bem mais preciso pode oferecer, já que a sensibilidade da fibra de sílica é da ordem de picômetros.

4.2 Sensoriamento em Ensaio de Rochas

O experimento se deu através de um ensaio de compressão simples uniaxial realizada na prensa hidráulica do LEMAC. Foram produzidos dois corpos de prova conforme a norma ASTM D7012-14 (AMERICAN...,2010) à partir de uma amostra da rocha. A norma especifica que a relação de comprimento e diâmetro deve respeitar a relação de 2:1 a 2,5:1. As amostras das rochas utilizadas são mostradas na figura 17, onde apenas uma de cada conjunto foi ensaiada.

Figura 17 - Amostras preparadas para ensaio



Fonte: próprio autor.

Após escolhidas os corpos de prova, as dimensões foram coletadas para registro e auxílio nos cálculos de pressão, exercidas em cada ensaio.

Tabela 3 - Dados dos corpos de prova ensaiados

Corpo de prova	Comprimento	Diâmetro
1	10,8	5,4
2	10,85	5,4

Fonte: próprio autor.

4.2.1 Primeiro experimento

4.2.1.1 Montagem e resultados experimentais

O primeiro experimento consistiu na fixação da FBG no sentido axial do corpo de prova 1 e o mesmo foi ensaiado na prensa do LEMAC. A prensa aplicou de forma gradual força de compressão no sentido axial até o rompimento do corpo de prova e a cada tonelada exercida, os dados coletados pelo interrogador eram salvos. A figura 18 figura o estado do corpo de prova após o ensaio.

Figura 18 - Corpo de prova 1 após o ensaio



Fonte: próprio autor.

Pode-se observar o formato cônico resultante após o ensaio, comprovando assim a correta compressão realizada pela prensa. Diante dos valores de reflexão da onda, medidas foram feitas utilizando-se do MATLAB e a equação abaixo (SCHMIDT-HATTENBERGER; NAUMANN; BORM, 2003) que relaciona a variação do comprimento de onda com a variação em *strain* foi aplicada.

$$\Delta\lambda = \lambda_B \cdot (1 - \rho_\alpha) \cdot \Delta\epsilon \quad (4.2.1.1)$$

onde:

$\Delta\lambda$ é a variação do comprimento de onda em relação ao comprimento de onda de referência;

λ_B é o comprimento de onda central

ρ_α é a constante fotoelástica da fibra, com valor de 0,22;

$\Delta\epsilon$ é a variação em strain do comprimento da fibra óptica.

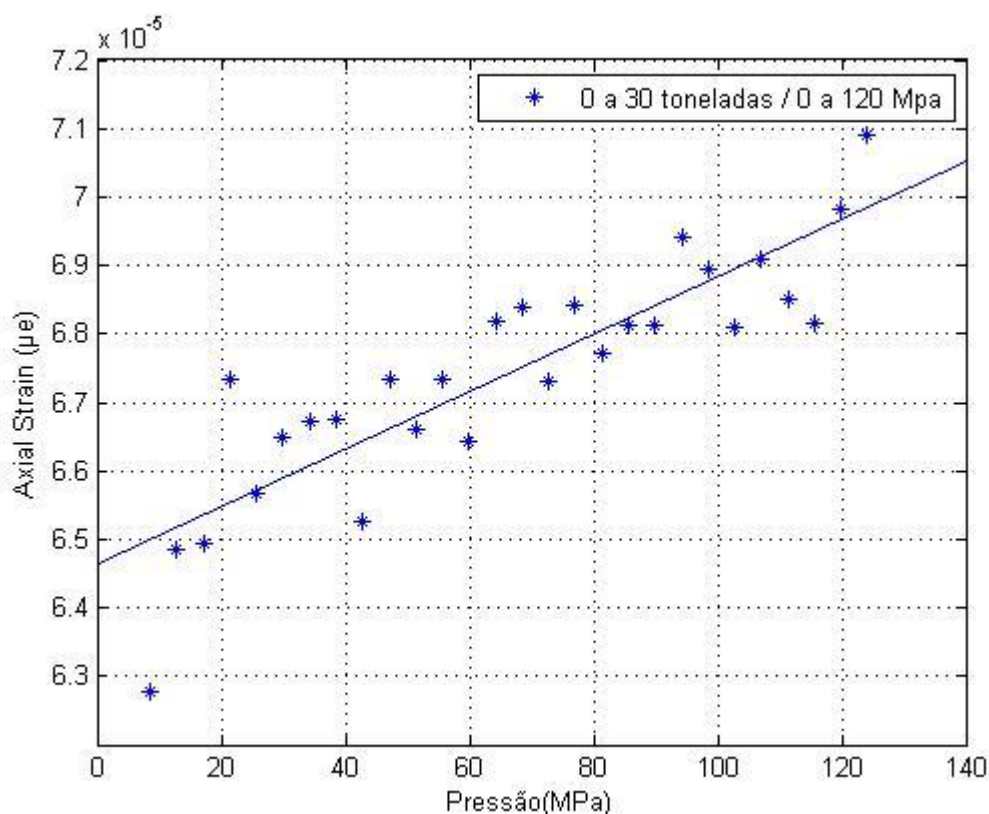
Os valores calculados estão listados na tabela 4. Ela relaciona a pressão exercida em MPa com a conseqüente variação da fibra em *strain*.

Tabela 4 - Dados calculados a partir do ensaio

Ton	MPa	$\Delta\lambda$	λ central (nm)	$1-\alpha$	$\Delta\epsilon$ calculado	ΔL (pm)	λ medido (nm)
0	0	0	1544.0286	0.78	0	0	1544.0286
1	4.281967	0.0531	1544.0286	0.78	4.409E-05	5.29085E-05	1543.9755
2	8.563933	0.0756	1544.0286	0.78	6.2773E-05	7.53274E-05	1543.953
3	12.8459	0.0781	1544.0286	0.78	6.4849E-05	7.78184E-05	1543.9505
4	17.12787	0.0782	1544.0286	0.78	6.4932E-05	7.7918E-05	1543.9504
5	21.40983	0.0811	1544.0286	0.78	6.734E-05	8.08076E-05	1543.9475
6	25.6918	0.0791	1544.0286	0.78	6.5679E-05	7.88148E-05	1543.9495
7	29.97377	0.08008	1544.0286	0.78	6.6493E-05	7.97913E-05	1543.94852
8	34.25573	0.08035	1544.0286	0.78	6.6717E-05	8.00603E-05	1543.94825
9	38.5377	0.0804	1544.0286	0.78	6.6758E-05	8.01101E-05	1543.9482
10	42.81967	0.0786	1544.0286	0.78	6.5264E-05	7.83166E-05	1543.95
11	47.10163	0.08108	1544.0286	0.78	6.7323E-05	8.07877E-05	1543.94752
12	51.3836	0.0802	1544.0286	0.78	6.6592E-05	7.99108E-05	1543.9484
13	55.66557	0.0811	1544.0286	0.78	6.734E-05	8.08076E-05	1543.9475
14	59.94753	0.08	1544.0286	0.78	6.6426E-05	7.97116E-05	1543.9486
15	64.2295	0.0821	1544.0286	0.78	6.817E-05	8.1804E-05	1543.9465
16	68.51147	0.08235	1544.0286	0.78	6.8378E-05	8.20531E-05	1543.94625
17	72.79343	0.081075	1544.0286	0.78	6.7319E-05	8.07827E-05	1543.947525
18	77.0754	0.0824	1544.0286	0.78	6.8419E-05	8.21029E-05	1543.9462
19	81.35737	0.08155	1544.0286	0.78	6.7713E-05	8.1256E-05	1543.94705
20	85.63933	0.08205	1544.0286	0.78	6.8128E-05	8.17542E-05	1543.94655
21	89.9213	0.08204	1544.0286	0.78	6.812E-05	8.17442E-05	1543.94656
22	94.20327	0.0836	1544.0286	0.78	6.9415E-05	8.32986E-05	1543.945
23	98.48523	0.08304	1544.0286	0.78	6.895E-05	8.27406E-05	1543.94556
24	102.7672	0.082	1544.0286	0.78	6.8087E-05	8.17043E-05	1543.9466
25	107.0492	0.0832	1544.0286	0.78	6.9083E-05	8.29E-05	1543.9454
26	111.3311	0.0825	1544.0286	0.78	6.8502E-05	8.22025E-05	1543.9461
27	115.6131	0.08208	1544.0286	0.78	6.8153E-05	8.17841E-05	1543.94652
28	119.8951	0.0841	1544.0286	0.78	6.9831E-05	8.37968E-05	1543.9445
29	124.177	0.0854	1544.0286	0.78	7.091E-05	8.50921E-05	1543.9432

Fonte: próprio autor.

A figura 19 lineariza os pontos plotados no plano que relaciona o *strain* calculado com a pressão exercida. A região elástica do gráfico omitida para que a região plástica pudesse ser linearizada. Nesse ensaio, o corpo de prova rompeu quando se aplicou 30,5 toneladas.

Figura 19 - Relação entre *strain* e pressão

Fonte: próprio autor.

4.2.1.2 Conclusões

Ao comparar com as curvas de carga em SCHMIDT-HATTENBERGER, et. al, percebe-se que a região de deformação plástica é concordante com a realizada nesse trabalho, porém a ordem de grandeza da variação é 10 vezes menor, o que pode significar que a rocha utilizada pode influenciar no quanto a rocha pode comprimir até a falha, ou seja, o desvio dos resultados obtidos pelas diversas técnicas de sensores é pequeno em comparação à variação comumente observada entre espécimes da mesma rocha.

4.2.2 Segundo experimento

4.2.2.1 Montagem e resultados experimentais

O segundo experimento consistiu na fixação da FBG no sentido axial do corpo de prova 2 e o mesmo foi ensaiado na prensa do LEMAC. A prensa aplicou de forma gradual força de compressão no sentido axial até o rompimento do corpo de prova e a cada tonelada exercida, os dados coletados pelo interrogador eram salvos. A figura 20 figura o estado do corpo de prova após o ensaio.

Figura 20 - Corpo de prova 2 após o ensaio



Fonte: próprio autor.

Pode-se observar o formato cônico resultante após o ensaio, comprovando assim a correta compressão realizada pela prensa. Diante dos valores de reflexão da onda, medidas foram feitas utilizando-se do MATLAB e a equação 4.2.1.1.

Os valores calculados estão listados na tabela 5. Ela relaciona a pressão exercida em MPa com a consequente variação da fibra em *strain*.

Tabela 5 - Dados calculados a partir do ensaio

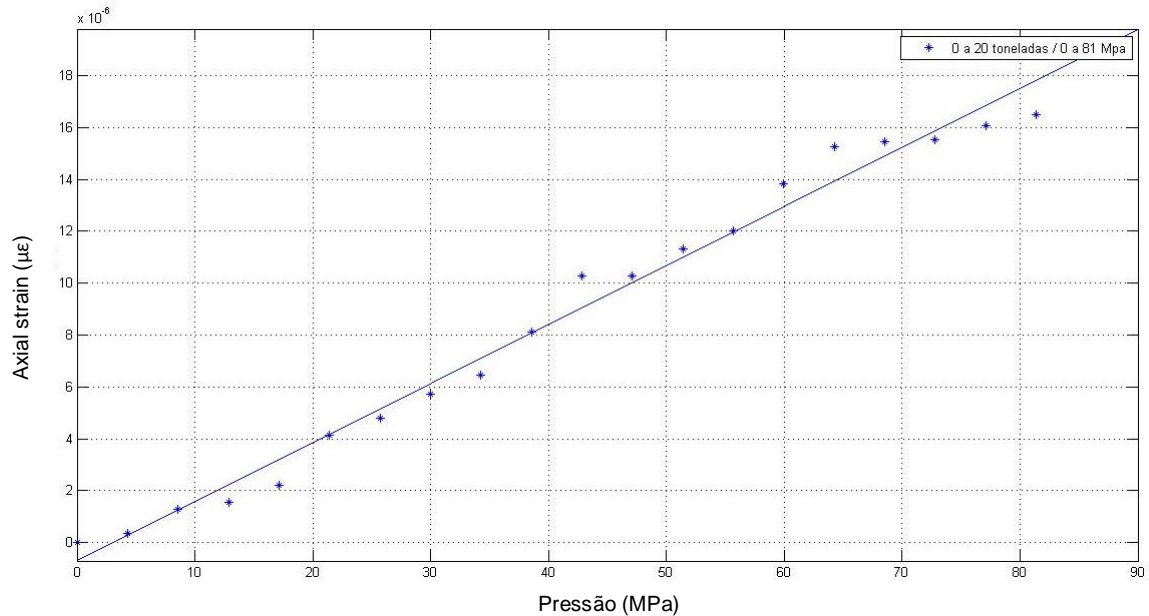
Ton	MPa	$\Delta\lambda$	λ central (nm)	$1-\alpha$	$\Delta\epsilon$ calculado	ΔL (pm)	λ medido (nm)
0	0	0	1551.996111	0.78	0	0	1551.996111
1	4.281966675	0.000453284	1551.996111	0.78	3.7444E-07	4.49331E-13	1551.995658
2	8.56393335	0.001565588	1551.996111	0.78	1.2933E-06	1.55193E-12	1551.994546
3	12.84590002	0.001892359	1551.996111	0.78	1.5632E-06	1.87586E-12	1551.994219
4	17.1278667	0.002673649	1551.996111	0.78	2.2086E-06	2.65033E-12	1551.993437
5	21.40983337	0.005013568	1551.996111	0.78	4.1415E-06	4.96985E-12	1551.991098
6	25.69180005	0.005817049	1551.996111	0.78	4.8053E-06	5.76632E-12	1551.990294
7	29.97376672	0.006917622	1551.996111	0.78	5.7144E-06	6.85729E-12	1551.989194
8	34.2557334	0.007829859	1551.996111	0.78	6.468E-06	7.76158E-12	1551.988281
9	38.53770007	0.009814809	1551.996111	0.78	8.1077E-06	9.72922E-12	1551.986296
10	42.81966675	0.012444547	1551.996111	0.78	1.028E-05	1.2336E-11	1551.983667
11	47.10163342	0.012444547	1551.996111	0.78	1.028E-05	1.2336E-11	1551.983667
12	51.3836001	0.01369727	1551.996111	0.78	1.1315E-05	1.35778E-11	1551.982414

13	55.66556677	0.014559339	1551.996111	0.78	1.2027E-05	1.44324E-11	1551.981552
14	59.94753345	0.016756331	1551.996111	0.78	1.3842E-05	1.66102E-11	1551.979355
15	64.22950012	0.018454879	1551.996111	0.78	1.5245E-05	1.82939E-11	1551.977656
16	68.5114668	0.018697226	1551.996111	0.78	1.5445E-05	1.85342E-11	1551.977414
17	72.79343347	0.018777774	1551.996111	0.78	1.5512E-05	1.8614E-11	1551.977333
18	77.07540015	0.019444441	1551.996111	0.78	1.6062E-05	1.92749E-11	1551.976667
19	81.35736682	0.019974824	1551.996111	0.78	1.6501E-05	1.98006E-11	1551.976136

Fonte: próprio autor.

A figura 21 lineariza os pontos plotados no plano que relaciona o *strain* calculado com a pressão exercida. Nesse ensaio, o corpo de prova rompeu quando aplicou-se 22,7 toneladas.

Figura 21 - Relação entre *strain* e pressão



Fonte: próprio autor.

4.2.2.2 Conclusões

Ao comparar a curva do primeiro experimento com o segundo, percebe-se que o segundo experimento variou o dobro, em *strain*. Isso demonstra que a variação dos resultados pode ser causada por motivos diversos, como a técnica de fixação, a resistência mecânica, o pré-tensionamento, e as próprias amostras de rocha ensaiadas.

5 CONCLUSÕES

Estudaram-se neste trabalho sensores em fibra baseados em grades de Bragg. Foram ensaiadas duas situações onde a instrumentação pode auxiliar ou até melhorar o processo de análise, aumentando a precisão dos ensaios realizados em laboratório.

O fato de existirem tecnologias consolidadas no mercado como o *strain gage* para medição de deformações não exige da necessidade de introduzir um sensor resistente à EMI e com alta precisão. Várias aplicações como instrumentação de estruturas de construção civil se tornariam mais eficientes com o uso de FBG's. O próprio ensaio de materiais pode ser otimizado com o uso deste sensor.

Nos ensaios realizados, considerou-se temperatura constante no ambiente de ensaio, porém sabe-se da relação entre temperatura e deformação com a mudança do comprimento de onda de Bragg.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As aplicações da FBG são inúmeras, mas considerando que a área de geotecnia pode ser auxiliada com o estudo de novas aplicações (por exemplo, no estudo de ponto de cisalhamento de rochas) com esse sensor, sugere-se a continuidade dos trabalhos para auxiliar na instrumentação das atividades desenvolvidas em âmbito acadêmico. Há boas possibilidades de iniciar projetos de pesquisa sobre cisalhamento de rochas utilizando FBG's com potencial para aplicação em projetos práticos ou na indústria. O simples sensoriamento de rochas no sentido radial já é de grande valia para o estudo do cisalhamento.

Além disso, os métodos de fixação da fibra podem ser avaliados e comparados, inclusive relacionando com outros sensores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SENIOR, J. M.; JAMRO, M. Y. **Optical Fiber Communications: Principles and Practice**. 3rd. ed. Inglaterra: Prentice Hall, 2008.

SILVA, G. E. da. **Implementação e caracterização da resposta dinâmica de transdutores de deformação e temperatura a fibras ópticas baseados em redes de Bragg** / G. E. da Silva. -- ed. rev. -- São Paulo, 2011. 238p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

UDD, E; SPILLMAN, W. B. **Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists**. 2nd. ed. Nova Jérsei: Wiley, 2011.

YIN, S.; RUFFIN, P. B.; YU, F. T. S.; eds. **Fiber optic sensors**. 2nd. ed. CRC Press, 2008.

KANOPOULOS, Patrick Paskalis. **Development of a Fibre Bragg Grating Sensor for Rock Deformation Monitoring**. 2014. 81 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil Engineering, University Of Toronto, Toronto, 2014.

SCHMIDT-HATTENBERGER, Cornelia; NAUMANN, Marcel; BORM, Günter. Fiber Bragg Grating Strain Measurements in Comparison With Additional Techniques for Rock Mechanical Testing. **Ieee Sensors Journal**. Germany, p. 50-55. fev. 2003.

FERREIRA, Glauber Maroto. **DESENVOLVIMENTO DE SENSORES EM FIBRA ÓPTICA PARA A MONITORAÇÃO DE TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO**. 2011. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

ALENCAR, Carlos Rubens Araujo, INSTITUTO EUVALDO LODI, 1969-159m. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais** / Instituto Euvaldo Lodi - Regional do Espírito Santo. Cachoeiro de Itapemirim/ES: IEL, 2013. 242 p. : il. color.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7012: standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures**. Philadelphia, 2010.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prencite Hall, 2004.

KUMAGAI, Naoiti et al. Long-term creep of rocks - experimental results with large specimens obtained in 27 years and those. **Journal Of The Society Of Materials Science Japan**. [s.i.], p. 484-489. nov. 1986.

OLIVEIRA, André Orlandi de. **Sistema para medida simultânea de temperatura e deformação com redes de Bragg em 800 nm**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

INC., Omega Engineering. **Introdução a Sensores de Deformação**. Disponível em: <<http://br.omega.com/prodinfo/sensores-de-deformacao.html>>. Acesso em: 06 fev. 2017.