

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Pedro Fontinelle Kilins Gehrt**

**Caracterização de extensômetros à rede de Bragg  
com compensação de temperatura**

**Projeto de Graduação**

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

Orientador: Arthur Martins Barbosa Braga  
Coorientador: Alexandre Sant'Anna Ribeiro

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2017

## **RESUMO**

### **Caracterização de extensômetros à rede de Bragg com compensação de temperatura**

Os sensores Fiber Bragg Grating (FBG) apresentaram um desenvolvimento significativo nos últimos anos, especialmente no setor industrial devido à sua versatilidade e capacidade de medição. Tendo importância nas diferentes áreas tecnológicas para criação de sistemas de monitoramento, devido os seus benefícios em relação aos sensores convencionais. Dentre as vantagens do FBG destacam-se a imunidade à interferências eletromagnéticas, pequenas dimensões e peso, além da fácil instalação, tornando esse tipo de sensor ideal em diversas aplicações, como em estruturas civis e em processos industriais. No entanto, a melhoria na confiabilidade e precisão do sensor continuam a ser parâmetros críticos para a implementação desta tecnologia, devido seu alto custo e podendo ser aprimorados pelo efeito de características mecânicas e ópticas da fibra. O presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivos: estudar o sensor à rede de Bragg, e montar uma bancada para fazer medições de deformação com o FBG e um strain gage elétrico comparando-os. A metodologia utilizada consistiu em experimentos que envolviam a calibração de temperatura dos sensores. Verificou-se nos resultados que para se fazer medições com FBG é necessário monitorar a variação de temperatura e aplicar uma correção aos dados. Conclui-se que os resultados obtidos foram satisfatórios para o experimento em questão, uma vez que a deformação aparente do sensor FBG com correção de temperatura, foi inferior a deformação observada com o strain gage elétrico.

Palavras-chave: Fiber Bragg Grating, sensor, sensor óptico, sensoriamento em ambientes hostis, deformação, sensor de temperatura, strain gage, FBG, compensação de temperatura.

## **ABSTRACT**

### **Characterization of Fiber Bragg Gratings extensometers with temperature compensation**

Fiber Bragg Grating (FBG) sensors has shown a significant growth in the latest years, especially in the industrial sector due to its versatility and measurement capability. Being important in different technological areas for the creation of monitoring systems, because of its benefits over conventional sensors. Among the advantages of the FBG are the immunity to electromagnetic interference, small dimensions, low weight, and easy installation, making this type of sensor ideal in many applications, like buildings and industrials processes. However, improvements in sensor reliability and accuracy continue to be critical parameters for the implementation of this technology, because of its high cost and the sensor can be improved by the effect of mechanical and optical characteristics of the fiber. The present work had as objectives: studying the Fiber Bragg Grating sensor, building a measurement apparatus for testing the FBG and an electric strain gage, comparing them. The methodology used consisted in experiments to calibrate the sensors temperature. It was verified in the results that to make measurements with FBG it is necessary to monitor the variation of temperature and apply a correction to the acquired data. It is concluded that the results obtained were favorable to the experiment in question, since the corrected FBG strain measurement varied less with the temperature than the strain gage.

**Keywords:** Fiber Bragg grating, sensor, optical sensor, harsh environment sensing, strain, Temperature sensors, strain gage, FBG, temperature compensation.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
1.1. O CAMPO DA FIBRA ÓPTICA	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.2. FIBER BRAGG GRATING	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.3. UTILIZAÇÃO DO FBG	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.4. VANTAGENS DO FBG SOBRE O STRAIN GAGE	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.5. APLICAÇÕES	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.6. TEORIA	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b>	<b>16</b>
2.1. MONTAGEM DO EXPERIMENTO	16
2.1.1. Procedimentos	16
2.1.2. Desenvolvimento de uma rotina no LabVIEW	22
2.2. EXPERIMENTOS	23
2.2.1. Compensação de temperatura do Strain Gage	27
2.2.2. Cálculo de coeficientes	30
<b>3. CONCLUSÃO</b>	<b>34</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>35</b>

## Lista de figuras

Figura 1.2.1: Representação esquemática do FBG. ....	10
Figura 1.2.2: Funcionamento do Fiber Bragg Grating. ....	10
Figura 2.1.1: Barra limpa. ....	17
Figura 2.1.2: Delimitação para instalação do strain gage. ....	17
Figura 2.1.3: Strain gage fixado a barra e com o terminal soldado. ....	17
Figura 2.1.4: Circuito de três fios. ....	18
Figura 2.1.5: Clivador de fibra fazendo um corte de 90°. ....	20
Figura 2.1.6: Fibra fixada a barra. ....	20
Figura 2.1.7: Configuração final dos sensores. ....	21
Figura 2.1.8: Barra completa. ....	22
Figura 2.2.1: Primeiro teste. ....	24
Figura 2.2.2: Influência de uma pequena variação de temperatura na medição do FBG. ....	24
Figura 2.2.3: Medição correta do strain gage. ....	25
Figura 2.2.4: Diferença da medição de deformação causada pela variação de temperatura entre o strain gage e a fibra. ....	26
Figura 2.2.5: Aproximação para obter $\alpha$ ótimo para o FBG. ....	26
Figura 2.2.6: Correção muito forte para fibra. ....	27
Figura 2.2.7: Com uma média para o $\epsilon$ aparente = 0,665104 $[(\mu\text{m})/\text{m}]$ , as curvas se sobrepõem. ....	28
Figura 2.2.8: Com uma média para o $\epsilon$ aparente = 0,312176 $[(\mu\text{m})/\text{m}]$ , as curvas se sobrepõem. ....	28
Figura 2.2.9: Com uma média para o $\epsilon$ aparente = 0,03175 $[(\mu\text{m})/\text{m}]$ , as curvas se sobrepõem. ....	29
Figura 2.2.10: Com uma média para o $\epsilon$ aparente = 0,536138 $[(\mu\text{m})/\text{m}]$ , as curvas se sobrepõem. ....	29
Figura 2.2.11: Aproximação para obter o coeficiente de temperatura. ....	31
Figura 2.2.12: Teste com coeficientes ótimos. ....	32
Figura 2.2.13: Deformação do strain gage. ....	32
Figura 2.2.14: Deformação do FBG. ....	33
Figura 2.2.15: Deformação do FBG com correção. ....	33

## **Lista de tabelas**

Tabela 1.1:Aplicações dos Sensores de Fibra Óptica segundo a área de segmento. ....	8
---	---

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. O CAMPO DA FIBRA ÓPTICA**

Nos últimos 40 anos, o campo da fibra óptica vem crescendo e avançando. Inicialmente, esta foi idealizada como um meio para transportar luz e imagens para aplicações médicas endoscópicas. Na década de 1960 era considerada um meio adequado de transporte de informações para aplicações em sistemas de telecomunicações (DAKIN; CULSHAW, 1988).

As vantagens das fibras ópticas são: não necessita energia elétrica, alta largura de banda, imunidade à interferência eletromagnética, tamanho pequeno e peso leve, alta sensibilidade, segurança em sua utilização, custo relativamente baixo e pouca necessidade de manutenção (UDD; SPILLMAN, 2011).

Atualmente, o mecanismo de detecção de fibra óptica envolve diversos sistemas, como laser biomédico, sensores militares de giroscópios, controle automotivo, dentre outros. Os sensores de fibra são bastante aceitos, e utilizados em aplicações de sensoriamento estrutural e monitoramento em engenharia civil, aeroespacial, marinha, petróleo e gás, estruturas inteligentes, indústria de energia elétrica, dentre outros (DAKIN; CULSHAW, 1988).

Áreas de segmento	Aplicações dos Sensores de Fibra Óptica
Petróleo e gás	Monitoramento de reservatório Matrizes sísmicas
Indústria de energia	Usinas de energia Caldeiras e turbinas à vapor Cabos de força Refinarias
Aeroespacial	Motores à jato Sistemas de foguete e propulsão
Civil	Pontes Barragens Estradas Túneis
Transporte	Monitoramento ferroviário Segurança de carros

Tabela 1.1: Aplicações dos Sensores de Fibra Óptica segundo a área de segmento.

Os sensores de fibra óptica podem ser categorizados em dois grupos: intrínsecos e extrínsecos. Os sensores intrínsecos permitem que a detecção ocorra dentro da fibra, sendo chamados também de sensores de fibra total. Já nos extrínsecos, a fibra é usada para transportar ondas de luz entre a fonte e o dispositivo de detecção para que a detecção ocorra fora da fibra. Os sistemas intrínsecos atraíram muitos pesquisadores principalmente devido à sua capacidade de serem incorporados em estruturas compostas. Dentre os sensores intrínsecos os que mais se destacam são os Fiber Bragg Gratings (FBG) (GRATTAN; SUN, 2000).

## 1.2. FIBER BRAGG GRATING

A tecnologia do FBG é uma das opções mais populares de sensores de fibra óptica para medições de tensão ou temperatura devido ao seu processo de fabricação simples e pelo sinal refletido ser relativamente forte. Eles são formados por modulações



periódicas do índice de refração do núcleo de fibra ao longo da direção longitudinal e podem ser produzidos por várias técnicas (CARNEIRO; BARBERO, 2014).

O termo *Fiber Bragg* provém da Lei de Bragg, sendo aplicado às estruturas periódicas inscritas dentro do núcleo de fibra convencional de telecomunicações. Em 1912, William Lawrence Bragg elaborou a Lei de Bragg de difração de Raio X. Este princípio é usado até hoje para o estudo e determinação da estrutura cristalina, particularmente na pesquisa de filmes finos. A difração de Bragg ocorre para uma radiação eletromagnética cujo comprimento de onda é da mesma ordem de grandeza do espaçamento atômico, quando incidente sobre um material cristalino. Neste caso, a radiação é espalhada de forma especular pelos átomos do material e experimenta interferências construtivas de acordo com a Lei de Bragg. Para um sólido cristalino com planos de rede separados por uma distância  $d$ , as ondas são dispersas e interferem de forma construtiva se o comprimento do caminho de cada onda for igual a um múltiplo inteiro do comprimento de onda (M. et al., 2013).

Por definição, os FBGs são variações periódicas do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica. Essas variações são geradas pela aplicação de um sinal óptico de grande intensidade no núcleo de uma fibra óptica (HILL; MELTZ, 1997).

Do ponto de vista da fonte de sinal óptico, os FBGs funcionam como um “espelho”, refletindo um comprimento de onda específico e deixando passar os demais comprimentos de onda. O comprimento de onda refletido está relacionado diretamente ao seu período óptico e ao seu índice de refração efetivo. Ao sofrer uma variação em uma dessas propriedades devido a uma deformação ou efeito térmico, o comprimento de onda refletido é alterado proporcionalmente (YIN; RUFFIN; YU, 2008).

Na **Figura 1.1.**, estão indicados o período e o comprimento da grade (sensor), além do núcleo e a casca da fibra óptica. A casca é a região ao redor do núcleo. A característica da fibra óptica que garante a variação permanente do índice de refração do núcleo induzida pela exposição à radiação ultravioleta é conhecida como fotossensibilidade.

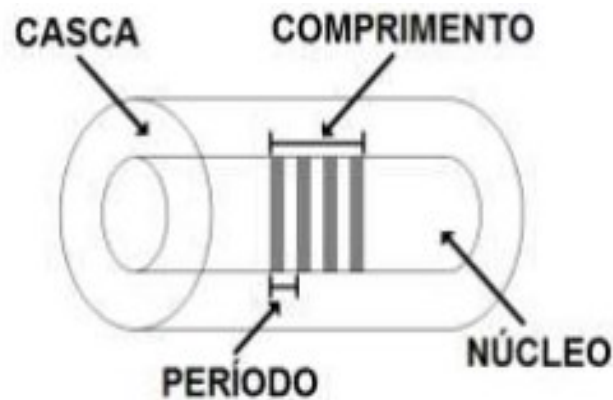


Figura 1.2.1: Representação esquemática do sensor FBG.

Fonte: CARNEIRO & BARBERO, 2014.

Os FBGs são normalmente identificados como uma perturbação periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica. Sua função pode ser descrita como um filtro interno para transmitir determinados comprimentos de onda de luz incidente e refletir comprimentos de onda específicos do espectro (Figura 1.2.2) (SKOLIANOS et al., 2016).

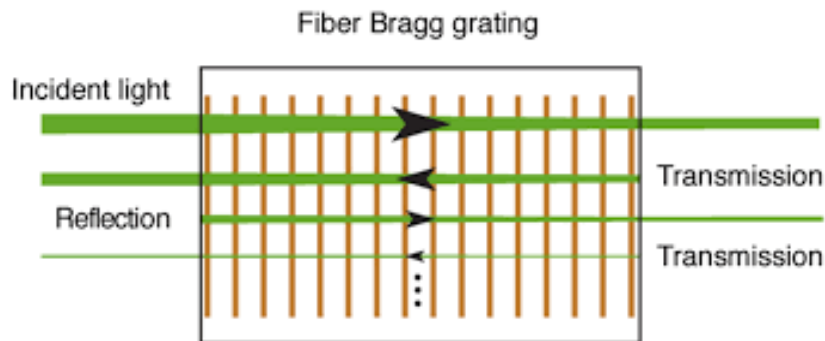


Figura 1.2.2: Funcionamento do Fiber Bragg Grating.

Fonte: SKOLIANOS et al., 2016.

Dentre as características do FBG destacam-se: a combinação com materiais compósitos, podendo ser integrado nos compósitos ou fixado/costurado na superfície dos objetos como um strain gage; consegue medir alongamentos muito grandes, sendo ótimo para materiais compósitos sob muita tensão; é pequeno e leve; imune a interferência eletromagnética; não precisa de energia; possível obter sinais com distâncias maiores de 50 km; em uma única fibra pode se usar diversos FBGs; alta estabilidade de uso; boa

resistência a corrosão; suporta temperaturas maiores de 700 °C; ótimo uso para criogenia pois tem condutividade em condições de baixa temperatura e propriedade ópticas estáveis; além de baixa interação com campos magnéticos e fácil instalação (EMMONS et al., 2010).

Seus defeitos são a dependência de altas temperaturas; não consegue compensar seu alongamento aparente (coeficiente expansão térmica do aço, alumínio e compostos de fibra); muito sensível a forças laterais ou pressão e pode haver erros de calibração em superfícies curvas (EMMONS et al., 2010).

Os mecanismos de detecção dos sensores FBG baseiam-se nas mudanças no comprimento de onda, direta (medição de picos de reflexão ou vales de transmissão) ou indiretamente (por exemplo: medição de potência óptica através de filtros). Devido à grande precisão nos resultados alcançados, mecanismos de detecção direta de comprimento de onda são considerados os mais adequados para medição de deformação e temperatura, entre outros. Os FBGs também são considerados como a parte importante na concepção de lasers de fibras ajustáveis e também de lasers semicondutores (BALL; MOREY; GLENN, 1991).

### 1.3. UTILIZAÇÃO DO FBG

A ideia de usar FBGs para aplicações de sensoriamento, especialmente em medição de deformação, foi introduzida por Bertholds et al. (1988), onde o coeficiente de deformação das fibras ópticas foi determinado. Esses coeficientes tornaram-se a base para estudar o comportamento dos FBGs em diversas aplicações industriais (BERTHOLDS; DANDLIKER, 1988).

Como exemplo, os FBGs foram implementados experimentalmente para medir deformações de tensão do eixo cilíndrico. Múltiplos destes sensores são examinados na determinação da forma desviada do modelo de feixe simples (TIAN; TAO, 2001).

Assim, o FBG é um sensor óptico capaz de relacionar grandezas físicas à variações no comprimento de onda refletido pela rede de Bragg. Entre essas grandezas estão: temperaturas, deslocamentos, acelerações, campos elétricos, tensões, pressões

e etc. O que torna esses sensores ópticos atrativos são as diversas características das fibras ópticas, herdadas pelos sensores FBGs (KIM; CHO, 2004).

Entre as características herdadas, podemos citar: imunidade a perturbações eletromagnéticas, não condutividade, resistência à temperatura igual às de fios de cobre, não necessitam de energia para funcionar, resistência à corrosão, dimensões reduzidas, capacidade de multiplexação, baixo custo de produção, entre outras (YIN; RUFFIN; YU, 2008).

Esse grande potencial de utilização está atrelado às características que os sensores FBG herdam das fibras ópticas. Contudo, apesar de apresentarem esse grande potencial de utilização, os sensores FBG ainda não adquiriram a popularidade dos sensores elétricos convencionais. Um dos principais fatores que impedem a popularização dos sensores FBG, está no alto custo de equipamentos capazes de interpretar, com confiabilidade, os sinais ópticos provenientes desses sensores.

#### 1.4. VANTAGENS DO FBG SOBRE O STRAIN GAGE

Os FBGs podem ser descritos como *enabling technologies*, pois permitem o desenvolvimento rápido e eficiente de novos sensores cujos benefícios superam as limitações dos sensores elétricos tradicionais, como o “strain gage” (SG) (BRAGHIN et al., 2013).

A partir dos sensores ópticos baseados em FBG é possível desenvolver sistemas inteligentes, os quais funcionam de forma dinâmica, tomando decisões baseadas nos valores do parâmetro monitorado. Como exemplos de sistemas inteligentes podemos citar as *smart structures*, reduzindo vibrações indesejadas que podem comprometer a integridade e segurança de uma estrutura, e as *smart grids*, avaliando o estado da linha aérea da rede de transmissão de energia elétrica (QI HUANG et al., 2010).

Os sensores FBG podem ser usados em estruturas civis, como prédios, pontes e rodovias, em processos industriais, como alimentos, laminados e petroquímicos, em medicina, química e biologia, em *smart grids*, monitorando equipamentos da linha de transmissão de energia elétrica, em ambientes hostis, como em poços de petróleo, oleodutos e estações espaciais, e em *smart structures*, como em asas de aeronaves,

cascos de navios e itens esportivos. Em muitas dessas aplicações, sensores à fibras ópticas (FBG) oferecem soluções bastante eficiente quando comparadas com os “strain gages” elétricos, reduzindo o peso e o custo dos sensores fixados ao material, além de realizarem a medição outros parâmetros, como temperatura e índice de refração, em tempo real (RAO, 1999).

Essas características tornam os FBGs ideais para aplicações em setores industriais onde os sensores elétricos não podem atuar ou não apresentam o desempenho desejado.

### 1.5. APLICAÇÕES

No decorrer dos últimos anos, os sensores de fibra óptica têm aumentado sua aceitação e uso generalizado para uma variedade de aplicações. Dentre o grande número de configurações de detecção de fibra óptica, os sensores baseados em FBG, mais do que qualquer outro tipo de sensor, tornaram-se amplamente conhecidos e populares, e tiveram um aumento na sua utilização e crescimento comercial (RAO, 1999).

Os FBGs possuem ampla capacidade para medir uma variedade de parâmetros, tais como tensão, temperatura, pressão, além da sua flexibilidade de design para ser usado como matrizes de detecção de ponto único ou multiponto e seu baixo custo relativo. Estas características tornam esses dispositivos ideais para uma multiplicidade de aplicações de sensoriamento e implementação em diferentes setores e indústrias (AMBROSINO et al., 2009).

Destacam-se as aplicações de FBG em campos aeroespaciais, de energia, petróleo e gás, transporte e subaquática. (Ambrosino et al. 2009) citam trabalhos relevantes nesta área: detecção estrutural e monitoramento de saúde de compósitos e estruturas em áreas aeronáuticas, sensores de pressão e temperatura para monitoramento de reservatórios de petróleo e gás, sensores acústicos para aplicações subaquáticas, e sistemas de alta tensão e alta sensação de corrente para a indústria de energia.

O mercado atual de sensores FBG é composto principalmente de 3 segmentos chave: 1) dispositivos de sensoriamento, 2) instrumentação e 3) serviços de integração e

instalação de sistemas. O segmento de dispositivos de detecção é composto de FBGs puros para aplicações de sensoriamento, sensores FBG embalados e matrizes FBG. O segmento de mercado de instrumentação é composto por instrumentos de interrogação FBG e componentes auxiliares relacionados, tais como multiplexadores, switches, sistemas de aquisição de dados, software e interfaces gráficas de usuário. Enquanto o terceiro segmento abrange principalmente serviços em vez de produtos, isso implica todos os aspectos de gerenciamento de projetos e engenharia relacionados à implementação de soluções de sensoriamento e instalações de sistemas, tais como design, planejamento, integração de sistemas, treinamento de clientes, serviços e instalações locais (MÉNDEZ, 2007).

Com base no princípio do FBG, um grande número de soluções baseadas nesta tecnologia foram propostas nas últimas décadas, como por exemplo para medição de: deformação, temperatura, ondas acústicas, medidas de ultrassom, além de campos de pressão e magnéticos. Esses sensores foram propostos, projetados e desenvolvidos para uma ampla variedade de aplicações de detecção mecânica, incluindo monitoramento de estruturas civis, fabricação inteligente e testes não destrutivos, sensoriamento remoto, aplicações subaquáticas e transporte (OTHONOS; KALLI, 1999).

## 1.6. TEORIA

Os sensores de fibra óptica à rede de Bragg medem deformação quando há um alongamento ou compressão onde a rede está instalada, neste local há diversos pontos de reflexão que quando se deformam fazem com que o comprimento de onda da luz que é guiada ao longo da fibra seja refletida (M. et al., 2013). A equação básica de sensores FBG relaciona o comprimento de onda  $\lambda$ , o espaçamento entre pontos de inflexão  $\Lambda$  e o índice de refração efetivo  $n_{eff}$ :

$$\lambda_B = 2 * n_{eff} * \Lambda \quad [1]$$

Assim através de uma interferência construtiva (ou destrutiva, depende da direção de observação) a luz refletida de cada ponto de reflexão irá se juntar formando picos. Logo, o comprimento de onda de cada pico de reflexão é alterado quando é aplicado uma deformação (KLECKERS; GÜNTHER, 2007):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k * \varepsilon \quad [2]$$

$\Delta\lambda$  = variação do comprimento de onda

$\lambda_0$  = Comprimento de onda inicial

$k$  = fator de sensibilidade a deformação

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}; \text{ Deformação}$$

A deformação  $\frac{\Delta L}{L}$  nesse caso é a variação do comprimento da rede. Para a sensibilidade a deformação ( $k$ ) foi utilizado inicialmente um valor teórico de 0.85, e na próxima seção foi calculado um valor experimental.

A equação [2] é o modelo mais simples para medição de deformação, onde não há variação de temperatura. Porém para medições precisas é necessário fazer uma compensação da temperatura, uma vez que a medição do FBG é extremamente sensível a temperatura. Normalmente em medições com FBG usa-se sensores de temperatura para fazer a correção do sinal.

Para calcular a sensibilidade a temperatura do comprimento de onda calcula-se a derivada parcial de [1] em relação a temperatura:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 * n_{eff} * \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + 2 * \Lambda * \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \quad [3]$$

Substituindo [1] duas vezes em [3]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\Lambda} * \frac{\partial\Lambda}{\partial T} * \Delta T + \frac{1}{n_{eff}} * \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} * \Delta T$$

O primeiro termo é o coeficiente de expansão térmico da sílica ( $\alpha$ ) e o segundo termo é o coeficiente termo-óptico ( $\eta$ ) que representa a dependência de temperatura do índice de refração (M. et al., 2013).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta) * \Delta T \quad [4]$$

Combinando [2] e [4], obtemos a equação completa com temperatura e deformação para o sensor:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k * \varepsilon + (\alpha + \eta) * \Delta T \quad [5]$$

Os coeficientes  $k$ ,  $\alpha$  e  $\eta$  dependem do material em que a fibra foi feito, logo para valores teóricos seria necessário a informação de fabricantes, na próxima seção será obtido esses valores experimentais e então será possível comparar as curvas de deformação do FBG e do FBG com a compensação de temperatura.

## **2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

### **2.1. MONTAGEM DO EXPERIMENTO**

Para verificar as diferenças de medição e instalação entre o “strain gage” e o FBG foi feito um experimento que consiste em instalar o “strain gage”, FBG e um Pt100 numa barra engastada na bancada com uma balança presa a sua ponta livre **Figura 2.1.8**.

#### **2.1.1. Procedimentos**

Primeiramente limpou-se a barra usando álcool e acetona **Figura 2.1.1**, delimitou a área onde o “strain gage” seria instalado **Figura 2.1.2**, após testar o “strain gage” com um multímetro ele foi colado a barra e soldado com um terminal usando 3 fios **Figura 2.1.3**, foi então colocado resina para protege-lo, a resina ficou secando de um dia para o outro. Depois os fios do “strain gage” foram colados com epoxy na barra.





Figura 2.1.1: Barra limpa.

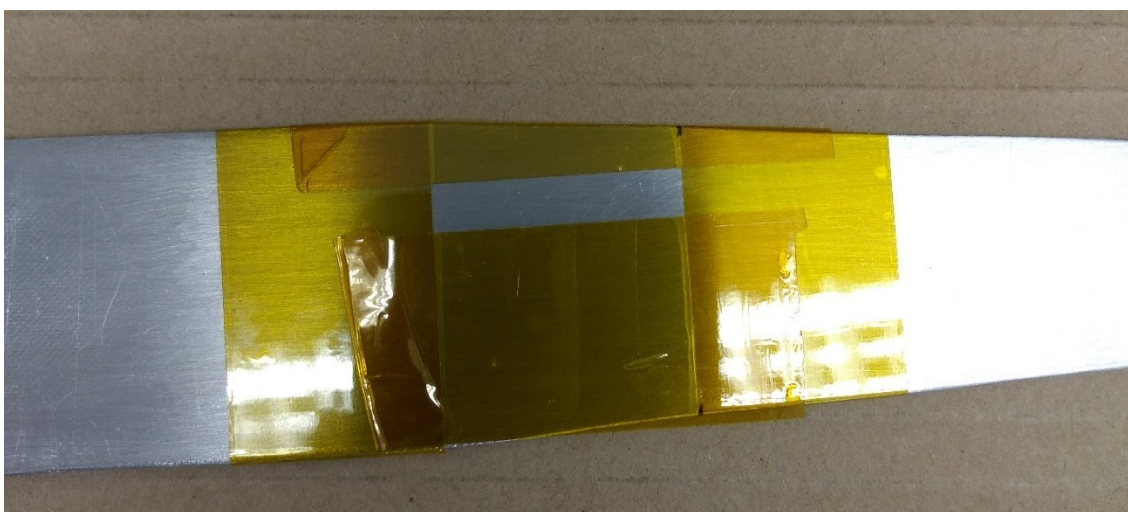


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..**2:Delimitação para instalação do “strain gage”.

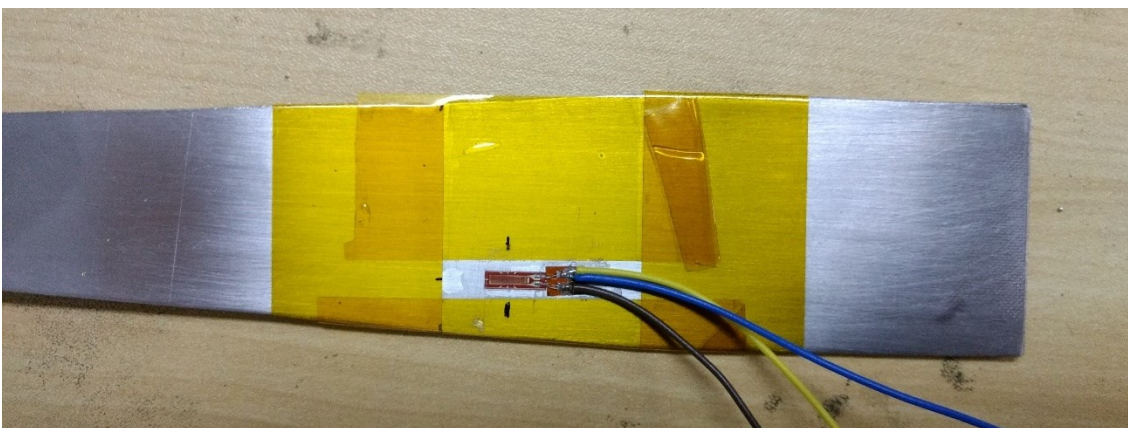


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..**3:”Strain gage” fixado a barra e com o terminal soldado.

### Instalação de 3 fios para o “strain gage”

Normalmente a conexão poderia ser feita usando apenas dois fios de baixa resistência ambos em série com o “strain gage”, porém esse tipo de conexão não seria eficiente, causaria uma assimetria e uma condição desbalanceada que é formada na ponte de wheatstone. Para uma ponte de wheatstone balanceada, é retirado um dos resistores e trocado pelo “strain gage”. (VISHAYPG, 2015).

Então a conexão será feita usando três fios (os três fios tem as mesmas dimensões e resistência), um fio extra é soldado ao terminal do “strain gage” **Figura 2.1.4**. Como  $R_{L1}$  e  $R_{L2}$  tem o mesmo comprimento logo a mesma resistência, as duas extremidades da ponte terão a mesma resistência assim sendo simétrica e balanceada desde que a mudança de temperatura dos fios seja similar. Então o terceiro fio ( $R_{L3}$ ) funcionará apenas como um sensor de tensão, como ele não está em série com nenhuma outra parte da ponte, ele não afetará o resto da ponte (HBM, 2017).

As vantagens do circuito de três fios são: Balanceamento da ponte de wheatstone, compensação da temperatura dos fios, e maior sensibilidade para medições, comparado com o circuito de dois fios (VISHAYPG, 2015).

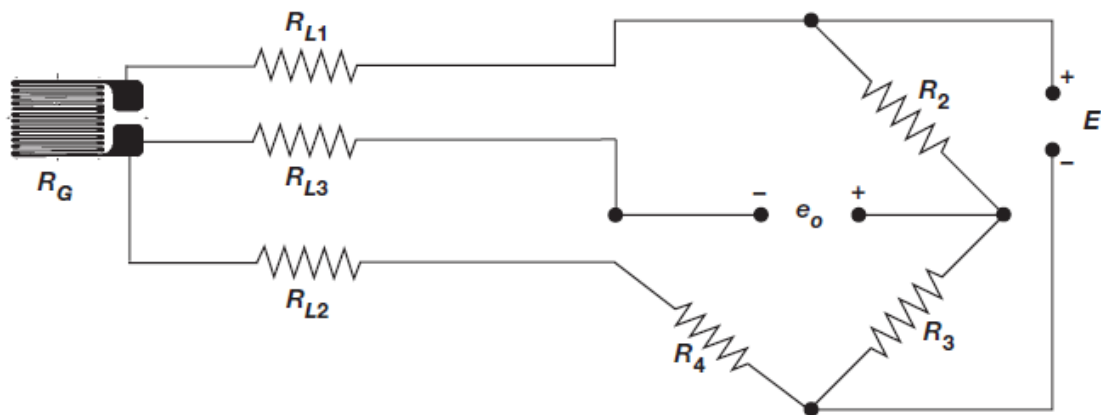


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..4**: Circuito de três fios.

Fonte: VISHAYPG, 2015.

### **Adesivo para o “strain gage”**

Não se deve usar qualquer tipo de adesivo para fixação de um “strain gage” a uma superfície. Esses adesivos devem satisfazer diversos requisitos (temperatura de operação, compatibilidade química, durabilidade, etc). O importante é garantir que não haverá escorregamento entre o “strain gage” e a superfície, o que resultaria em medições erradas. Por isso que há uma cola correta para cada condição de uso.

Por esse ser um experimento feito dentro do laboratório onde não há temperaturas extremas, foi utilizado Cianoacrilato, que resiste aproximadamente de  $-55^{\circ}\text{C}$  até  $+100^{\circ}\text{C}$ . Foram feitos testes (próxima seção) para confirmar que não houve escorregamento.

### **Instalação do sensor FBG**

Inicialmente a fibra com o sensor foi desencapada na extremidade a ser conectada ao interrogador e limpa com álcool. A fibra é colocada no clivador para fazer um corte preciso de  $90^{\circ}$  **Figura 2.1.5**, com o corte preciso feito é possível usar a máquina de emendar para soldar a fibra sensora à uma outra convenientemente conectorizada. A máquina de emenda gera um arco elétrico que faz a temperatura das faces da fibra aumentar até derreter e soldar ambas fibras.

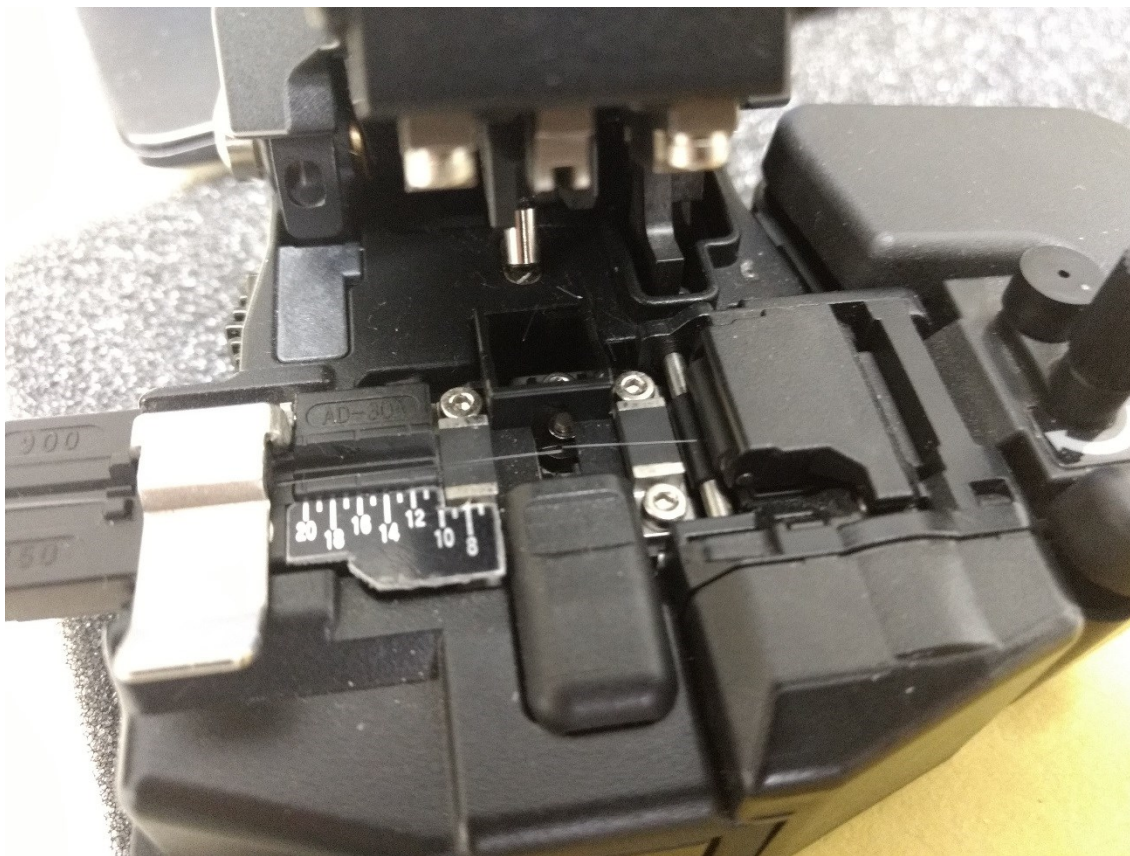


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..**5: Clivador de fibra fazendo um corte de 90°.

Ligou-se a fibra ao interrogador e aproximou um ferro de solda para confirmar a posição do sensor ao longo da fibra para fazer as marcações e alinhar o “strain gage” com o FBG na barra. Fixou-se o sensor FBG com adesivo (cianoacrilato) e depois resina de silicone para proteção **Figura 2.1.6**, deixando a ponta da fibra para fora caso tenha-se que minimizar o ruído de fundo (eliminar reflexões indesejáveis).



Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..**6: Fibra fixada a barra.



Para finalizar a montagem o Pt100 foi montado com quatro fios e após fixar a barra na bancada de trabalho o Pt100 foi preso a barra com uma fita **Figura 2.1.7** e depois envolto em pasta térmica para maximizar a transferência de calor.

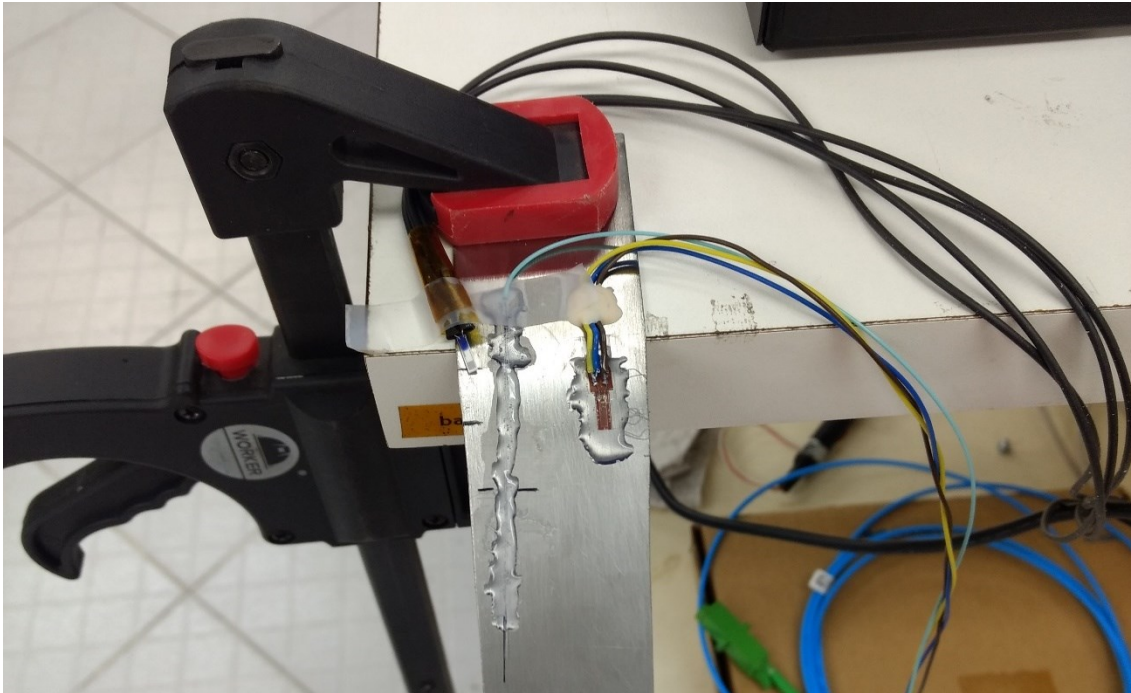


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..7**: Configuração final dos sensores.

### Conexão de 4 fios para medir temperatura

A conexão de quatro fios é usada para obter uma precisão melhor na medição uma vez que dois fios estarão no percurso de alta impedância utilizados apenas para medição de tensão e os outros dois vão conduzir a corrente, logo tendo como vantagem não serem afetados pela resistência dos cabos (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).



Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.**8: Barra completa.

### **2.1.2. Desenvolvimento de uma rotina no LabVIEW**

Após ligar o Pt100 e o “strain gage” ao módulo da National Instruments e ligar o FBG ao Micron Optics foi desenvolvido uma rotina no LabVIEW que foi utilizado durante todo o experimento para zerar as medidas dos sensores, fazer gráficos em tempo real, aplicar as equações do FBG, tanto para transformar o comprimento de onda em unidades de deformação, como para fazer a compensação de temperatura e registrar os dados coletados em arquivo tipo tdms. Este software serviu para este experimento e esta rotina

será utilizada como base para futuros experimentos do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio para facilitar na aquisição de dados de diversos sensores.

## 2.2. EXPERIMENTOS

Foram realizados dois tipos de testes, um teste cíclico para saber se as instalações dos sensores foram feitas corretamente ou se há escorregamento entre os sensores e a barra, principalmente na fibra, já que sua área de contato é menor. Outro tipo de teste, de longa duração (+8 horas), onde as variações de temperatura ambiente foram registradas com condicionamento de ar desligado, de forma a medir a influência da temperatura na medição de deformação da fibra (deformação aparente). Através de uma aproximação linear foi possível obter um coeficiente  $\alpha_T$  ótimo para [5] assim tendo uma medição de deformação do sensor FBG corrigida em temperatura para o tipo de material utilizado (aço 304). Sendo:

$$\alpha_T = (\alpha + \eta)$$

Inicialmente foi usado um  $k=0.78$  teórico, porém foi calculado um novo valor experimental.

Para medir o comportamento dos sensores este teste cíclico foi feito com pesos de 100g da seguinte forma: 0g – 100g – 200g – 300g – 400g – 500g – 400g – 300g – 200g – 100g – 0g, cada peso ficou um minuto até adicionar ou retirar o próximo da sequência.

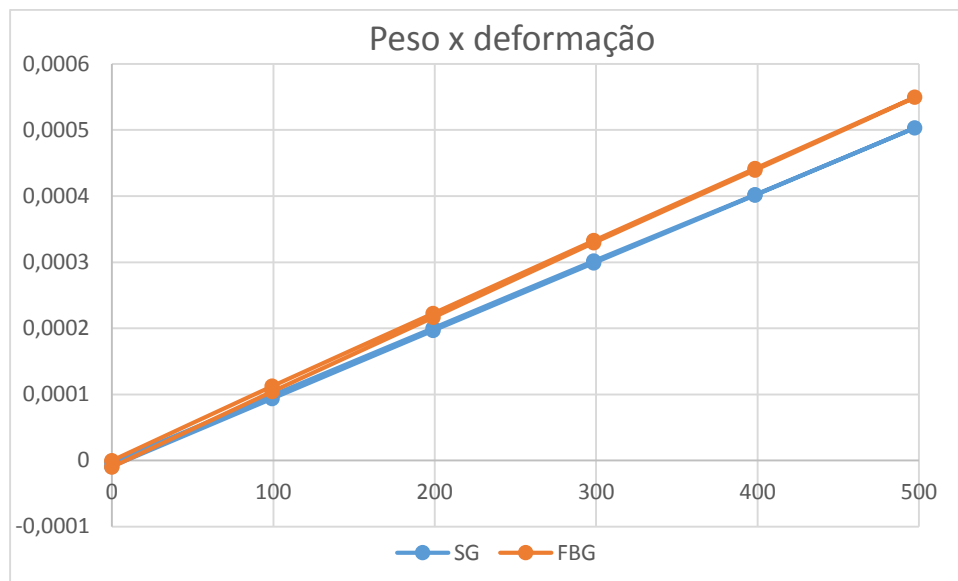


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..9**: Primeiro teste

Cada ponto do gráfico **Figura 2.2.1** é uma média de 60 medições de cada sensor, durante este teste houve uma variação de aproximadamente 0,25 °C e já é possível ver a diferença entre as medições do “strain gage” e do FBG e, ao comparar os pontos iniciais é possível ver que o FBG **Figura 2.2.2** não retornou exatamente ao ponto inicial, enquanto que na medição com “strain gage” observou-se o retorno **Figura 2.2.3**. Neste caso, não se pode afirmar se houve algum erro de instalação na fibra pois essa diferença pode ser causada pela temperatura.



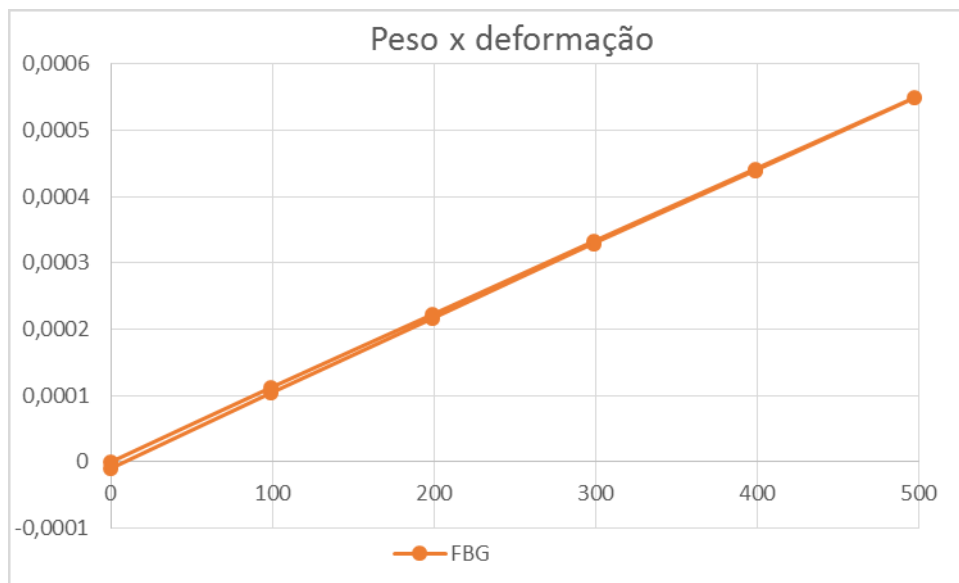


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..**10: Influência de uma pequena variação de temperatura na medição do FBG

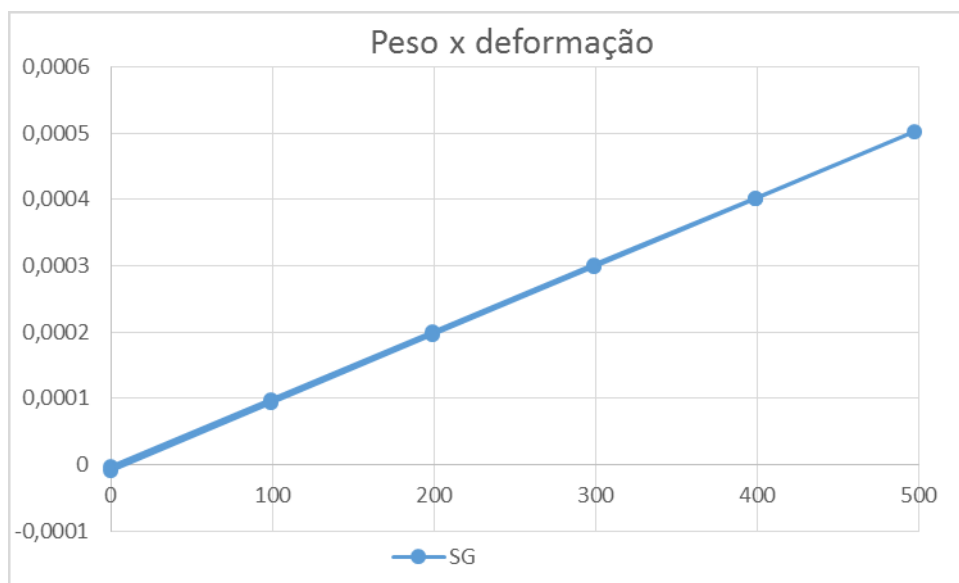


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..**11: Medição correta do "strain gage"

Como dito anteriormente, a temperatura tem uma grande influência na medição da fibra. Para determinar o coeficiente de temperatura, primeiramente fez-se um teste durante a noite com uma variação lenta de temperatura de aproximadamente  $\Delta T = 5^\circ \text{C}$ .

Os dados obtidos **Figura 2.2.4** mostram uma diferença aproximada de  $\epsilon = 8 \mu\text{m/m}$  entre as medições com FBG e com “strain gage”. Para consertar determinação da correção a ser aplicada, inicialmente fizemos uma aproximação linear do comprimento de onda do FBG em função da temperatura (**Figura 2.2.5**).

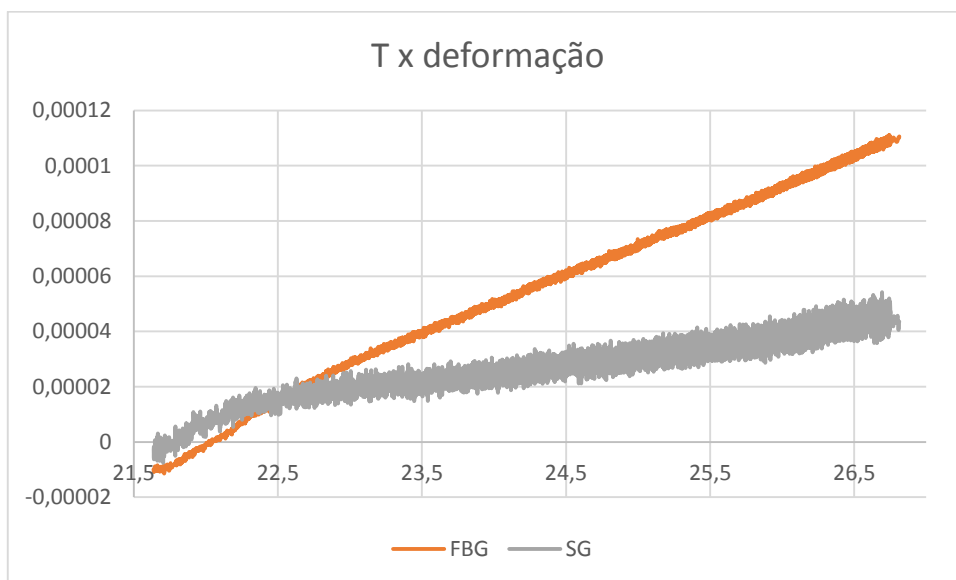


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..12**: Diferença da medição de deformação causada pela variação de temperatura entre o “strain gage” e a fibra

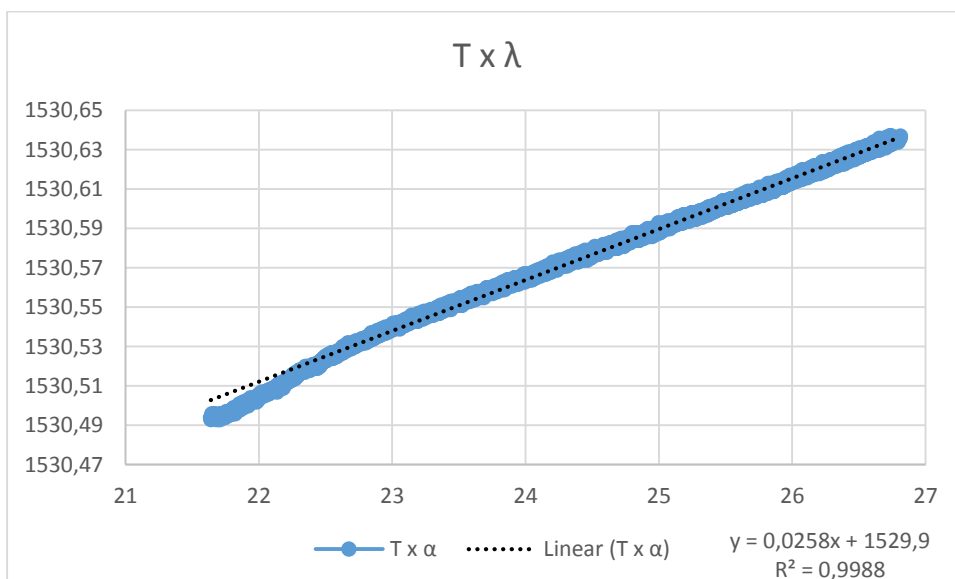


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..13**: Aproximação para obter  $\alpha$  ótimo para o FBG

A partir da aproximação linear, obteve-se o coeficiente  $\alpha_T = 25,8 \frac{pm}{^\circ C}$ , utilizando-o em [5] é possível fazer novos testes para verificação de um  $\alpha_T$  ótimo.

Um novo teste **Figura 2.2.6** mostrou que o coeficiente  $\alpha_T = 25,8 \frac{pm}{^\circ C}$  faz uma correção muito intensa, fazendo que quanto maior fosse a temperatura menor fosse a deformação, inclusive invertendo o sentido da deformação.

Adicionalmente foi feito um estudo sobre a influência da temperatura sobre o “strain gage”. Para melhor determinação dos coeficientes.

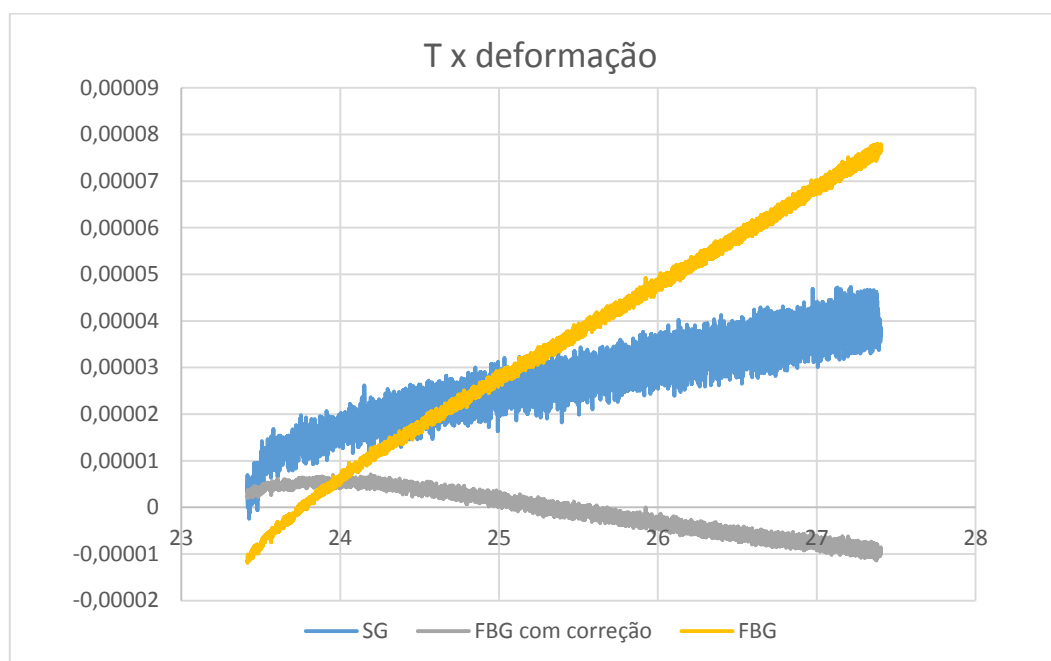


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..14:** Correção muito forte para fibra

### 2.2.1. Compensação de temperatura do Strain Gage

Enquanto que o “strain gage” está configurando para compensar a dilatação térmica de um aço 4340 com coeficiente de expansão  $k = 11,3 * 10^{-6} \left[ \frac{1}{^\circ C} \right]$  a barra foi feita de aço 304 que tem coeficiente  $k = 17,3 * 10^{-6} \left[ \frac{1}{^\circ C} \right]$  (SHUKLA; DALLY, 2014).

Assim sendo, enquanto o “strain gage” é compensado para medição em um substrato com uma determinada dilatação térmica, a barra em questão possui uma

dilatação térmica maior, porém é possível compensar a leitura errada do “strain gage” com a formula que foi fornecida pelo fabricante:

$$\varepsilon_{app} = -0,37 * 10^2 + 0,31 * 10^1 * T - 0,72 * 10^{-1} * T^2 + 0,33 * 10^{-3} * T^3 - 0,12 * 10^{-6} * T^4 \left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right] \quad [6]$$

Essa formula [6] é uma aproximação do  $\varepsilon_{app}$  para temperatura em que o “strain gage” foi calibrado.

A seguir, foi feita esta correção em alguns testes:

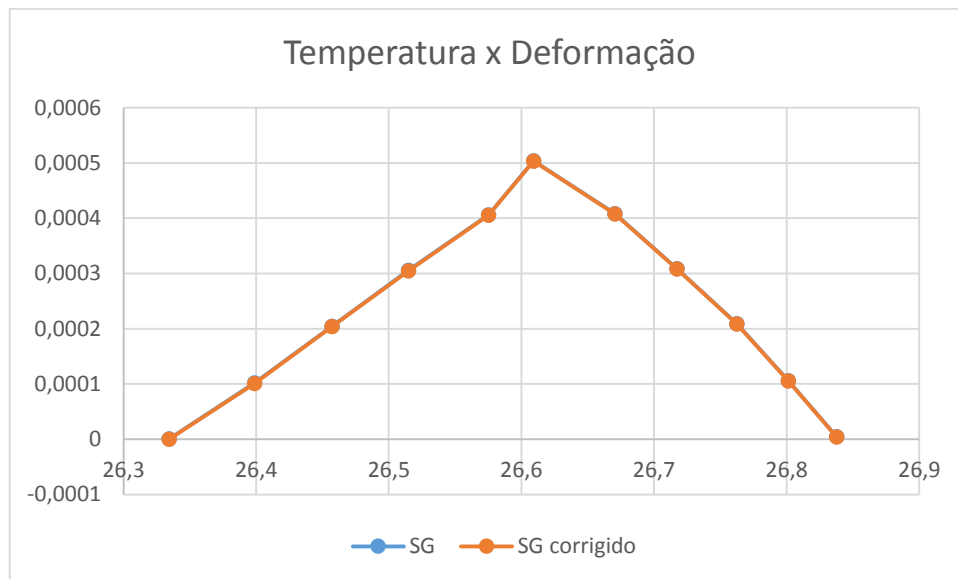


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..15:** Com uma média para o  $\varepsilon$  aparente = 0,665104 [(μm)/m], as curvas se sobrepõem

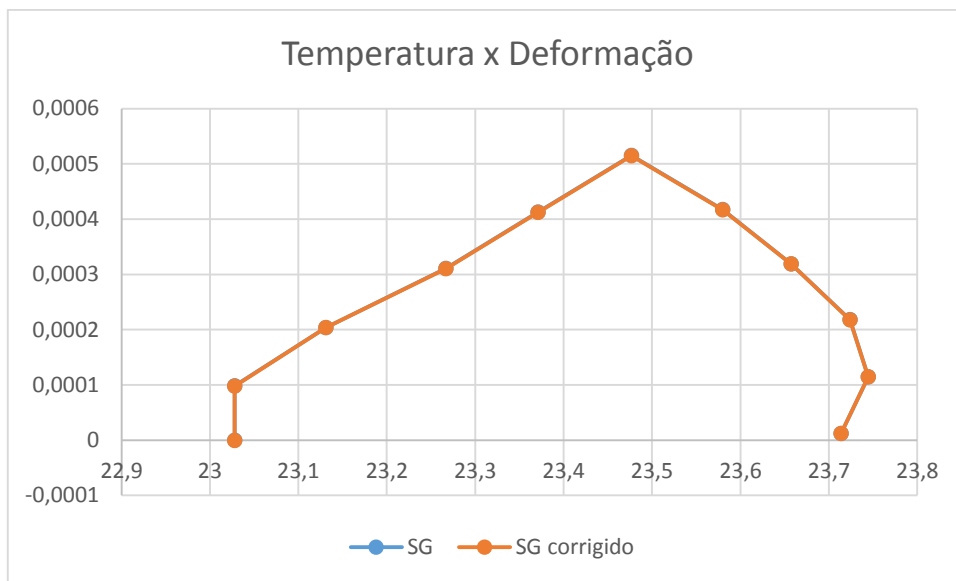


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..16**: Com uma média para o  $\epsilon$  aparente =  $0,312176 \text{ [}(\mu\text{m})/\text{m}]$ , as curvas se sobrepõem

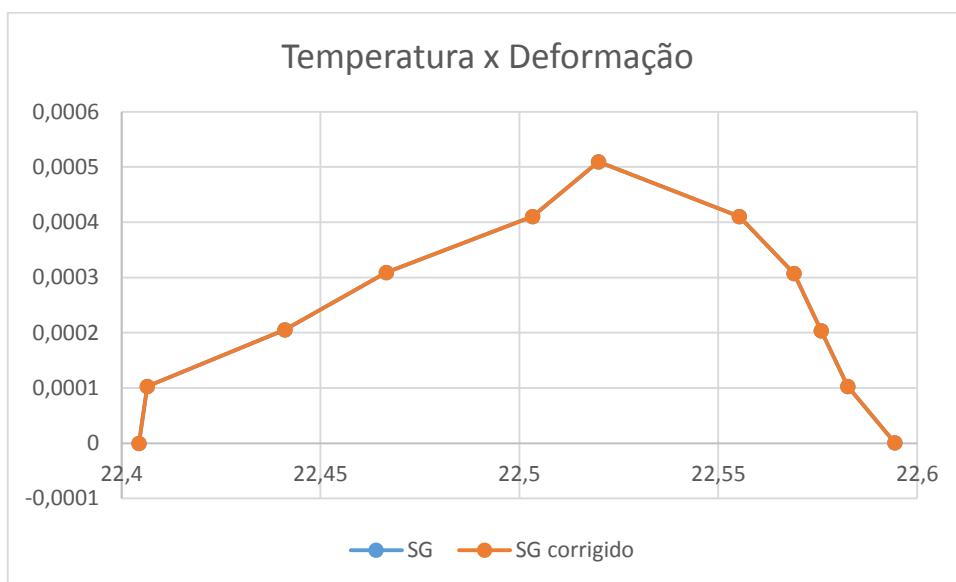


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..17**: Com uma média para o  $\epsilon$  aparente =  $0,03175 \text{ [}(\mu\text{m})/\text{m}]$ , as curvas se sobrepõem

Essas três correções foram feitas em testes 0g-500g-0g, observa-se que em todos, as curvas estão sobrepostas mesmo em diversas temperaturas.

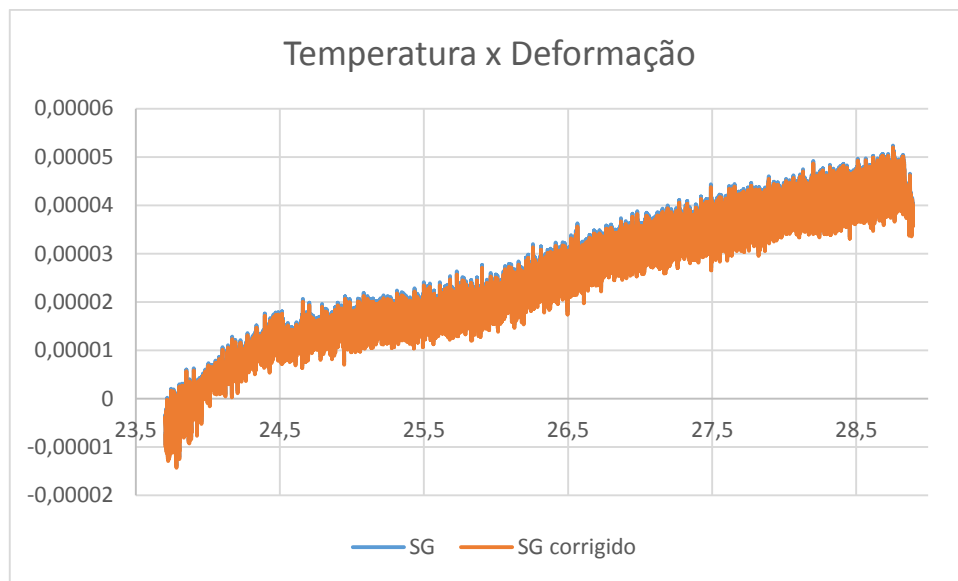


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..18**: Com uma média para o  $\epsilon$  aparente = 0,536138  $[(\mu\text{m})/\text{m}]$ , as curvas se sobrepõem

Essa última correção foi feita durante a noite onde teve uma maior variação de temperatura e mesmo assim os pontos das curvas continuaram bem próximos. Como esse teste foi feito sem adição de pesos é possível comparar as médias do SG:  $\epsilon = 3,4 \left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right]$  e da correção  $\epsilon = 3,34499 \left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right]$ , isso é uma diferença de  $\epsilon = 0,536 \left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right]$ . É possível reparar pelas medições anteriores que essa diferença não será muito significativa quando estiver sendo medido deformações maiores.

Após realizar estas correções é possível ver que a curva da correção sempre está sobreposta com a curva sem correção, logo a temperatura não tem uma influência significativa às medições do “strain gage” feitas nesses testes. É possível ainda estimar pela **Figura 2.2.9** que o “strain gage” foi calibrado em alguma temperatura próxima a de  $T = 22,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , pois foi onde teve o menor  $\epsilon$  aparente.

## 2.2.2. Cálculo de coeficientes

Como visto anteriormente, será possível usar o “strain gage” como referência pois a variação de temperatura afetou pouco em suas medições. Então para medir o fator de sensibilidade a deformação da fibra será feita a seguinte manipulação em [2]:

$$k = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} * \frac{1}{\Delta\varepsilon}$$

A partir dos picos de medições anteriores obtêm-se um fator apropriado para este experimento de

$$k = 0,84794. [7]$$

O cálculo teórico do coeficiente de temperatura leva em conta o índice de refração da sílica mais a diferença entre o coeficiente de expansão da barra e o coeficiente de expansão que o “strain gage” está calibrado, assim obtendo  $\alpha_T = 15,15 \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , o que está distante do valor já medido. Porém esse valor será apenas uma referência, já que não se sabe corretamente os coeficientes da fibra que está sendo usada.

Com o novo fator [7] é possível fazer um novo teste para descobrir o coeficiente de temperatura. Neste teste também teve aproximadamente  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ , porém pela inclinação da reta **Figura 2.2.11** foi obtido um  $\alpha_T = 17,66 \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , o que está bem mais próximo da teoria que o anterior.

Assim é possível fazer um novo teste de longa duração **Figura 2.2.12**, e pelo comportamento da curva cinza (FBG com correção) em comparação com as outras duas curvas é possível ver que quase não houve variação devido a temperatura, assim atingindo o objetivo deste teste. Nesta medição a referência do “zero” do sistema foi efetuada na temperatura mais elevada de aproximadamente  $29,2^\circ\text{C}$ .

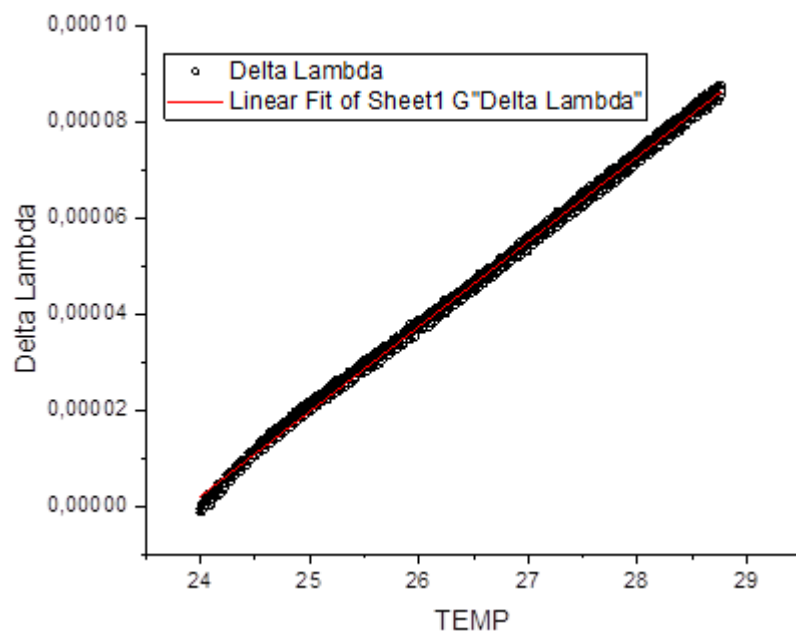


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..19:**  
Aproximação para obter o coeficiente de temperatura

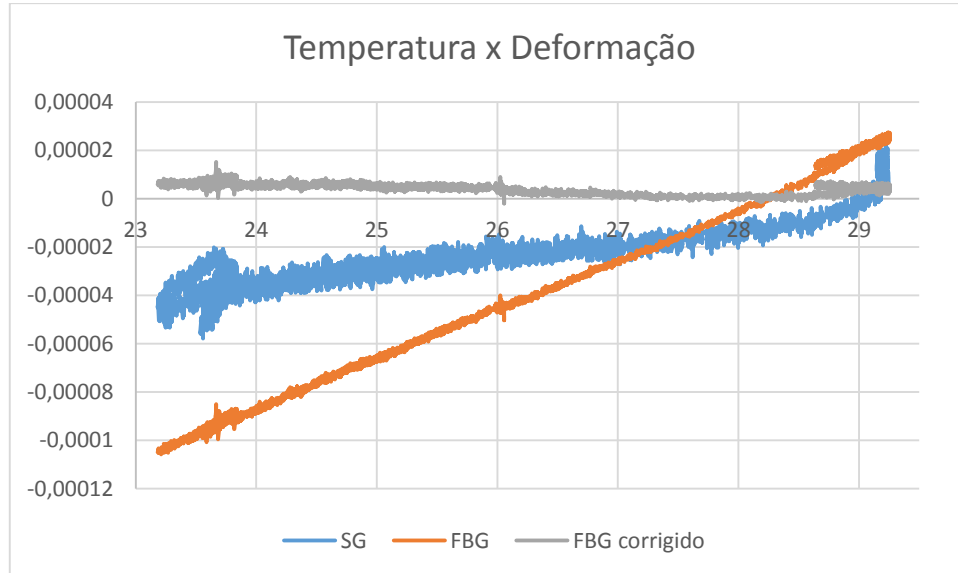


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..20:** Teste com  
coeficientes ótimos



Agora, com os novos coeficientes é possível continuar os testes com peso e verificar que a diferença nas medições foi causada pela pequena variação de temperatura e não por um escorregamento da fibra.

Neste novo teste houve uma variação de 0,7 °C e percebe-se pelas **Figura 2.2.13** e **Figura 2.2.14** que tanto o “strain gage” quanto o FBG não voltaram para posição inicial enquanto que o FBG com correção **Figura 2.2.15** não teve uma variação perceptível entre as medições, logo cumprindo o seu objetivo.

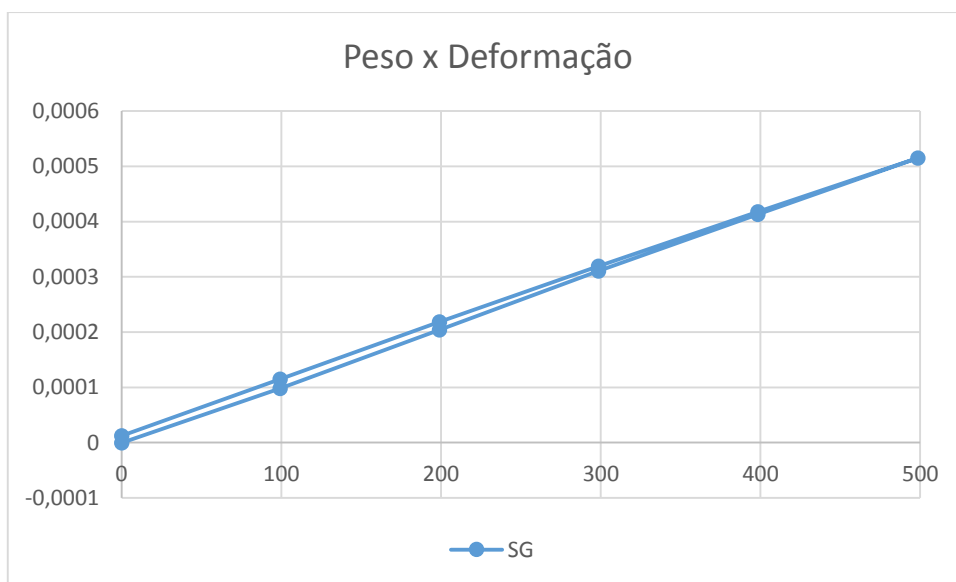


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..21**: Deformação do “strain gage”

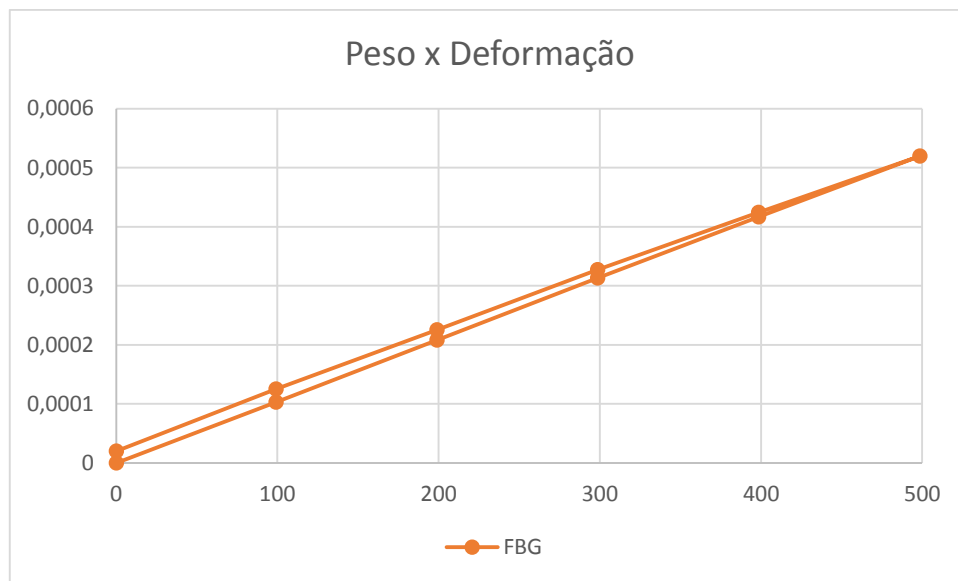


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..22**: Deformação do FBG

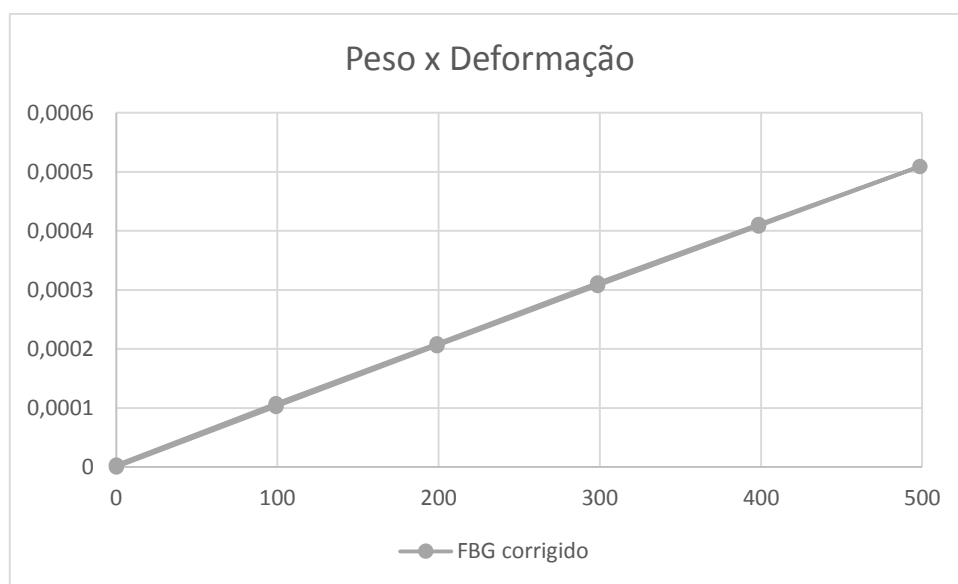


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..23**: Deformação do FBG com correção

### **3. CONCLUSÃO**

Neste trabalho, verificou-se a importância do Fiber Bragg Grating nas diferentes áreas tecnológicas para criação de sistemas de monitoramento, devido as suas vantagens em relação aos sensores convencionais. Se mostrando, cada vez mais, capazes de atuar em áreas onde sensores elétricos convencionais não são capazes de atuar, ou onde estes não apresentam o desempenho e a segurança necessários.

Os sensores FBG apresentam vantagens como imunidade a interferências eletromagnéticas, pequenas dimensões e peso, além da fácil instalação, tornando esse tipo de sensor ideal em diversas aplicações, como em estruturas civis e em processos industriais.

Este trabalho mostra o procedimento de montagem de uma bancada de testes e os resultados experimentais, visando a importância do monitoramento da temperatura para a correção das medidas do FBG comparando com um “strain gage” elétrico.

Percebeu-se durante todo o experimento a facilidade de instalação e manuseio do FBG em comparação com o “strain gage”. No entanto, todo dado obtido pelo FBG teve que passar por uma correção de temperatura para poder ser adequadamente interpretado.

Por fim, ressalta-se a importância do método e experimento utilizado obtendo resultados favoráveis uma vez que o FBG corrigido variou menos em função da temperatura do que o “strain gage”. Sendo um bom fator no processo de aprendizagem e na construção de conhecimento no presente trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBROSINO, C.; IADICICCO, A.; CAMPOPIANO, S.; CUTOLO, A.; GIORDANO, M.; CUSANO, A. FIBER BRAGG GRATING SENSORS: INDUSTRIAL APPLICATIONS. In: RIGHINI, G. C.; TAJANI, A.; CUTOLO, A. (Ed.). **Series in Optics and Photonics**. [s.l.] WORLD SCIENTIFIC, 2009. 7p. 34–76.

BALL, G. A.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. Standing-wave monomode erbium fiber laser. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 3, n. 7, p. 613–615, jul. 1991.

BERTHOLDS, A.; DANDLIKER, R. Determination of the individual strain-optic coefficients in single-mode optical fibres. **Journal of Lightwave Technology**, v. 6, n. 1, p. 17–20, jan. 1988.

BRAGHIN, F.; CAZZULANI, G.; CINQUEMANI, S.; RESTA, F. Potential of FBG sensors for vibration control in smart structures. In: **Anais...IEEE**, fev. 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6518533/>>. Acesso em: 3 dez. 2017.

CARNEIRO, A. C.; BARBERO, A. P. L. Princípio de Funcionamento dos Sensores Ópticos Baseados em Grades em Fibras Ópticas e sua Importância nas Diferentes Áreas Tecnológicas. **Engevista (UFF)**, v. 16, p. 389–403, 2014.

DAKIN, J.; CULSHAW, B. (ed.). **Optical fiber sensors: Applications, analysis, and future trends**. Boston: Artech House, 1988.

EMMONS, M. C.; KARNANI, S.; TRONO, S.; MOHANCHANDRA, K. P.; RICHARDS, W. L.; CARMAN, G. P. Strain Measurement Validation of Embedded Fiber Bragg Gratings. **International Journal of Optomechatronics**, v. 4, n. 1, p. 22–33, 31 mar. 2010.

GRATTAN, K. T. V.; SUN, T. Fiber Optic Sensor Technology: An Overview. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 82, n. 1–3, p. 40–61, maio 2000.

HBM. **Successfully compensating for lead resistances**. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/3458/tips-and-tricks-successfully-compensating-for-lead-resistances/>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

HILL, K. O.; MELTZ, G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1263–1276, ago. 1997.

KIM, N.-S.; CHO, N.-S. Estimating Deflection of a Simple Beam Model Using Fiber Optic Bragg-Grating Sensors. **Experimental Mechanics**, v. 44, n. 4, p. 433–439, ago. 2004.

KLECKERS, T.; GÜNTHER, B. Optical versus electrical strain gages: A comparison. **HBM Measurements**, 2007.

M., M.; B. ALLIL, R. C. S.; A., B.; DE NAZAR, F. V. B. A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors. In: CUADRADO-LABORDE, C. (Ed.). **Current Trends in Short- and Long-period Fiber Gratings**. [s.l.] InTech, 2013.

MÉNDEZ, A. Fiber Bragg grating sensors: a market overview. In: **Anais...**4 jul. 2007. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.738334>>. Acesso em: 3 dez. 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Como fazer medições de temperatura com RTDs: Guia prático**. Disponível em: <<http://www.ni.com/tutorial/7115/pt/>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing**. Boston, Mass: Artech House, 1999.

QI HUANG; CHANGHUA ZHANG; QUNYING LIU; YAN NING; YONGXING CAO. New type of fiber optic sensor network for smart grid interface of transmission system. In: **Anais...IEEE**, jul. 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5589596/>>. Acesso em: 3 dez. 2017.

RAO, Y. . Recent Progress in Applications of in-Fibre Bragg Grating Sensors. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 31, n. 4, p. 297–324, abr. 1999.

SHUKLA, A.; DALLY, J. W. **Experimental solid mechanics**. [s.l.: s.n.]

SKOLIANOS, G.; ARORA, A.; BERNIER, M.; DIGONNET, M. Slow light in fiber Bragg gratings and its applications. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 49, n. 46, p. 463001, 23 nov. 2016.

TIAN, X. G.; TAO, X. M. Torsion Measurement Using Fiber Bragg Grating Sensors. **Experimental Mechanics**, v. 41, n. 3, p. 248–253, set. 2001.

UDD, E.; SPILLMAN, W. B. (ed.). **Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists**. 2nd ed ed. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2011.

VISHAYPG. **Strain Gages and Instruments: The Three-Wire Quarter-Bridge Circuit**. Disponível em: <<http://www.vishaypg.com/docs/11092/tt612.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

YIN, S.; RUFFIN, P. B.; YU, F. T. S. (ed.). **Fiber optic sensors**. 2nd ed ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.