



Estudo Comparativo de Sensores Strain-Gauges e Fibras Ópticas FBG para Instrumentação de Estacas Metálicas Tubulares Submetidas a Flexão

Fernando Artur Brasil Danziger

Professor, UFRJ / Escola Politécnica e COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, danziger@coc.ufrj.br

Marcelo Martins Werneck

Professor, UFRJ / COPPE (PEE e PENT), Rio de Janeiro, Brasil, werneck@coppe.ufrj.br

Regina Célia da Silva Barros Allil

Professora, UFRJ / COPPE (PEE), Cidade, Rio de Janeiro, Brasil, reginaallil@coppe.ufrj.br

João Henrique Diniz Guimarães

Engenheiro Mecânico Consultor, MWERT Consultoria, Projetos e Gestão, Rio de Janeiro, Brasil, joao.guimaraes@mwert.com.br

Gustavo Santos Domingos

Engenheiro Civil Pesquisador, UFRJ / COPPE (PEC), Rio de Janeiro, Brasil, gustavodom@coc.ufrj.br

Arthur Veiga Silvério Pinheiro

Engenheiro Civil Pesquisador, UFRJ / COPPE (PEC), Rio de Janeiro, Brasil, arthur_veiga@poli.ufrj.br

André Dias Souza

Mestrando, UFRJ / COPPE (PEE), Rio de Janeiro, Brasil, andre.diassouza@coppe.ufrj.br

Paulo Henrique Silva Pinto

Mestre, UFRJ / COPPE (PEE), Rio de Janeiro, Brasil, paulo.hsp11@gmail.com

Edgard Luis dos Santos Bispo

Técnico, UFRJ / COPPE (PEC), Rio de Janeiro, Brasil, edgardluis2000@yahoo.com.br

RESUMO: A instrumentação de provas de carga em estacas é geralmente realizada com emprego de *strain-gauges* colados na armadura da estaca (estacas de concreto) ou na própria estaca (estacas metálicas). Uma alternativa recente aos *strain-gauges* consiste em sensores a fibra óptica. Sua utilização em comparação aos *strain-gauges* incorpora vantagens: redução do número de cabos e conexões, maior eficiência na transmissão dos sinais, independente da distância do cabeamento, não sujeição a descargas elétricas, e medição de vários pontos na mesma fibra. Adicionalmente, cada *strain-gauge* necessita sua própria interface eletrônica, enquanto que com a fibra óptica todos os sensores estão na mesma fibra e assim apenas um sistema de interrogação consegue demodular todos os sensores. Este trabalho compara os resultados obtidos em calibrações no laboratório com esses dois tipos de sensores na instrumentação de uma estaca tubular de aço (diâmetro 178 mm; comprimento 6 m) submetida a flexão. Os sensores empregados são do tipo FBG (*Fiber Bragg*

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Gratings), os quais utilizam fibras ópticas de pequenos diâmetros. Os resultados obtidos evidenciam o potencial de emprego das fibras ópticas de modo mais sistemático em provas de carga horizontais em estacas.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de Carga Instrumentada, Strain Gauges, Fibra Óptica

ABSTRACT: The instrumentation of pile load tests is usually carried out by mounting strain gauges either on pile reinforcement bars (concrete piles) or on the pile itself (steel piles). A recent option consists of using fiber optic sensors. Their advantages are: reducing the amount of cables and electronic connections; more efficiency in signal transmission, regardless of cable length; free of electric discharges; and the ability of measuring several points in the same fiber. In addition, while each strain gauge has its own interface, with fiber optics all sensors are located in the same fiber, requiring only one interrogation system to demodulate all sensors. This study compares results from laboratory calibration tests in which both types of sensors were used to instrument a 178 mm diameter, 6 m length steel pile. The optic fiber sensors employed are of FBG (*Fiber Bragg Gratings*) type, which make use of small diameter fiber optics. The results show the potencial of widespread use of fiber optics on horizontal pile load tests.

KEYWORDS: Instrumented Pile Load Test, Strain Gauges, Fiber Optics

1 Introdução

A instrumentação de estacas em provas de carga é um recurso que permite o conhecimento da interação do solo/rocha com o elemento estrutural da estaca, adicionando valor às provas de carga convencionais, onde se conhecem apenas os deslocamentos e as cargas na extremidade da estaca (Velloso e Lopes, 2002). A instrumentação fornece elementos para um melhor entendimento do funcionamento das fundações, seja na avaliação das cargas mobilizadas no fuste e na ponta de estacas solicitadas axialmente (ex. Lopes, 1986; Falconi *et al.*, 2016), ou na mobilização esforços laterais (empuxos ativo e passivo) de estacas submetidas a carregamentos laterais, por exemplo para a determinação das denominadas curvas p-y (ex. Reese e Van Impe, 2011).

Dentre as formas de instrumentação de estacas destacam-se o uso de *strain-gauges* colados nas armaduras de estacas de concreto ou em estacas metálicas, uso de *strain-gauges* de corda vibrante, extensômetros removíveis e, mais recentemente, sensores de fibra óptica. As vantagens e desvantagens de cada uma dessas tecnologias podem ser vistas em Szymkiewicz *et al.*, 2021.

Este artigo apresenta os resultados de um estudo comparativo em laboratório de dois sensores de deformação, um do tipo *strain-gauge* (SG) e um do tipo fibra óptica de Rede Bragg (FBG) em uma estaca tubular de aço (diâmetro externo 178 mm; comprimento 6 m) submetida a flexão na parte central onde os sensores foram instalados.

2 Redes de Bragg em fibra ópticas (FBG) e Strain-gauges (SG)

Redes de Bragg em fibra óptica (*Fiber Bragg Gratings* – FBG) trata-se de perturbações periódicas gravadas na fibra óptica. Essas perturbações se dão através da modulação do índice de refração. Quando isso ocorre, dependendo do período dessas perturbações, a luz que incide na

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



rede de Bragg é refletida em um comprimento de onda específico, conforme mostrado na Figura 1a. Portanto, as FBGs atuam como um filtro, deixando passar a maior parte da luz, porém refletindo uma pequena parte.

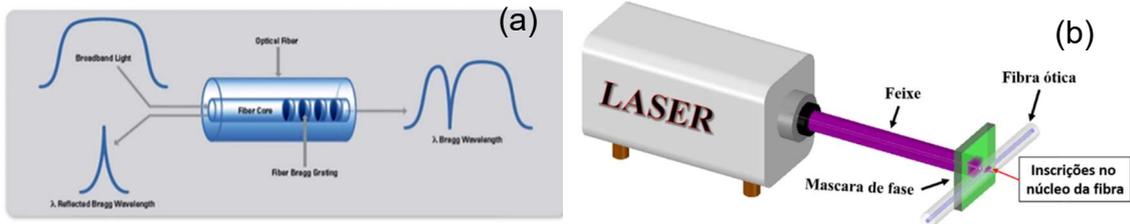


Figura 1. Sensor de fibra óptica do tipo rede Bragg (FBG): (a) ilustração do funcionamento da FBG; (b) configuração para fabricação de FBG.

O comprimento de onda da luz que é refletido λ_B irá depender do período espacial das perturbações Λ e do índice de refração efetivo do núcleo n_{eff} . A relação entre essas grandezas é dada por:

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \tag{1}$$

Qualquer alteração no período Λ altera o comprimento de onda λ_B . E essas alterações ocorrem ou por deformação mecânica das fibra ou por alteração da temperatura. A relação entre a variação do comprimento de onda refletido $\Delta\lambda_B$ e as alterações mecânicas e térmicas na fibra é dada por:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta)\Delta T + (1 - \rho_e)\Delta\varepsilon \tag{2}$$

onde, α é o coeficiente de dilatação térmica da fibra e η é o coeficiente termo-óptico, ambos relacionados à sensibilidade da fibra à variação da temperatura, ρ_e diz respeito ao coeficiente efetivo para o efeito foto-elástico, que influencia na sensibilidade da fibra em relação ao *strain* ε . Portanto, as FBGs podem ser utilizadas como sensores de temperatura e de *strain*.

A metodologia utilizada na instrumentação com base em *strain-gauges* (SG) é a ponte completa de Wheatstone, necessária para eliminar os efeitos da temperatura que podem ocorrer durante o monitoramento da deformação. Para a obtenção da deformação por flexão do elemento estrutural, considera-se que as resistências da ponte de Wheatstone (4 no total) possuem o mesmo *gauge factor*. É importante salientar que a deformação calculada em função do sinal de saída é uma média das 4 deformações que compõem a ponte completa.

2.1 Método de gravação da FBG

Para a gravação de um sensor FBG é incidido sobre o núcleo da fibra uma luz ultravioleta (UV) de alta potência. Quando a luz UV atinge os dopantes da fibra no núcleo o índice de refração naquela região muda. Para criar um padrão ao longo da fibra é usado uma máscara de fase com comprimento específico Λ que difrata a luz em vários feixes.

A Figura 1b ilustra a montagem experimental empregada, utilizando a técnica de

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



mascaramento de fase. A inscrição das FBGs foi realizada usando um laser de argônio contínuo (300C MOTOFRED), com comprimento de onda de 244 nm e potência de saída de 40 mW. Uma máscara de fase foi utilizada para obter o comprimento de onda de Bragg em aproximadamente 1550 nm. Antes do processo de inscrição, a fibra óptica (SMF28, Corning®) foi submetida a hidrogenação para garantir uma FBG com refletividade superior a 70%.

2.2 Calibração das FBGs para *strain*

Para calibrar as FBGs como sensor de *strain*, foi utilizada uma cesta para colocar os pesos e realizar a conexão com o interrogador óptico (da marca Micron Optics, modelo si155) em uma das extremidades da FBG. A outra extremidade da FBG foi fixada em uma mesa com furos, de forma a tracionada a FBG pela cesta com os pesos. A foto da Figura 2a apresenta o arranjo empregado na calibração das duas FBGs fabricadas para os testes. A cada peso adicionado na cesta, foi medido o comprimento de onda refletido pela FBG, através do interrogador óptico, e, a partir das propriedades elásticas da fibra, calculado os valores de *strain* e de onde obteve-se as constantes de calibração dos sensores, respectivamente 1,3873 e 1,1176 pm/με (Figura 2b). A Tabela 2 apresenta as características da fibra óptica utilizada para os sensores FBG.

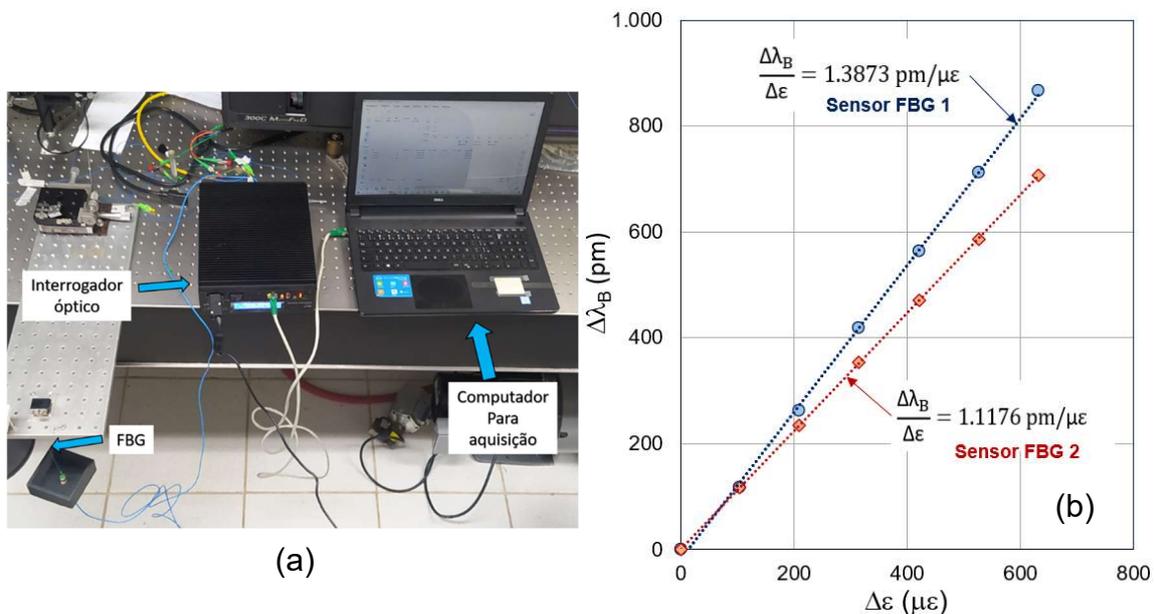


Figura 2. Calibração dos sensores FBGs para *strain*: (a) arranjo de calibração; (b) constantes

Tabela 2. Características da fibra óptica utilizada na fabricação dos sensores FBG.

Material	Sílica, SiO ₂
Módulo de Young	69,2 GPa
Diâmetro da fibra (casca + núcleo)	125 μm
Diâmetro do núcleo da fibra (dopado com germânio)	9 μm

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



3 Procedimento experimental

3.1 Instalação dos sensores

Os testes comparativos dos sensores SG (do tipo ponte completa – unidirecional duplo) e FBGs foram realizados em um tubo-estaca, de diâmetro nominal externo 7 polegadas ($D_{ext} = 178$ mm), e espessura da parede de 11,5 mm. Os sensores foram instalados na parte central do tubo, em posições diametralmente opostas de um plano vertical que passa pela linha de centro (1 FBG de cada lado), e onde as cargas foram aplicadas (ver item 3.2). A Figura 3 apresenta as etapas de limpeza da superfície (com lixa 400 e condicionador (ácido) + neutralizador) e colagem dos sensores (SG e FBGs).

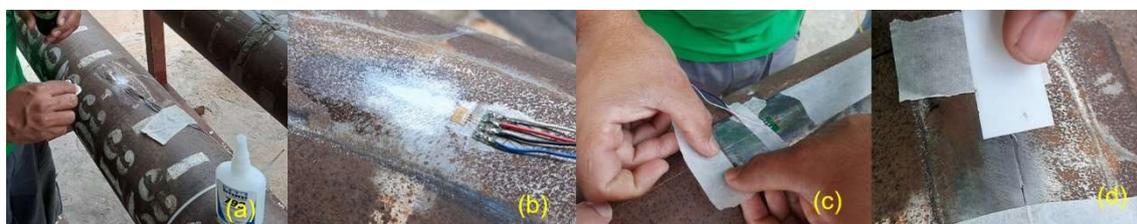


Figura 3. Instalação dos sensores SG e FBGs: (a) limpeza da superfície; (b) limpeza para colagem da FBG. SG já instalado; (c) tração da fibra com FBG para colagem; (d) FBG colada na superfície.

3.2 Metodologia dos testes

O tubo-estaca foi simetricamente bi-apoiado sobre uma estrutura metálica na posição horizontal, e carregado, também de forma simétrica, através da colocação de pesos num pendural de aço (Figura 4), de forma que, no trecho central do tubo, onde os sensores foram instalados, o momento fletor é constante (Figura 4b). Para fins de estimativa do *strain* teórico no local onde os sensores foram instalados, foi utilizada a expressão 3, derivada da mecânica estrutural e da Teoria da Elasticidade.

$$\Delta\varepsilon = \pm \frac{My}{EI} \quad (3)$$

onde, na seção de análise, $\Delta\varepsilon$ é a variação do *strain* na “fibra” tracionada ou comprimida, M é o momento fletor, y é a distância da linha neutra à “fibra” tracionada ou comprimida, E é o módulo de Young do aço (205 GPa), e I é o momento de inércia da seção do tubo ($2,1 \times 10^{-5} \text{ m}^4$).

Foram realizados 6 ciclo de carregamento e descarregamento (3 na posição 0° - 180° e 3 na posição 180° - 0° – Figura 4c), cada ciclo com 11 incrementos de carga (incluindo o peso próprio do pendural), com pesos de aproximadamente 0,1 kN, que resultaram em incrementos de momento fletor da ordem de 0,2 kN.m (máximo 2,2 kN.m).

A aquisição dos dados do sensor SG foi feita com um módulo PX455 da HBM, enquanto que para os dois sensores FBG foi utilizado o mesmo interrogador das calibrações (Micron Optics si155). Para estimativa do *strain* do sensor SG (tipo PA-09-060HB-350-LEN, da Excel Sensores), foi utilizado o *gauge factor* do sensor fornecido pelo fabricante (igual a 2,18), aplicando-se a expressão 4, onde V_{in} é a tensão de alimentação e ΔV_{out} é a variação do sinal de saída (tensão).

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta V_{out}}{2,18 V_{in}} \quad (4)$$

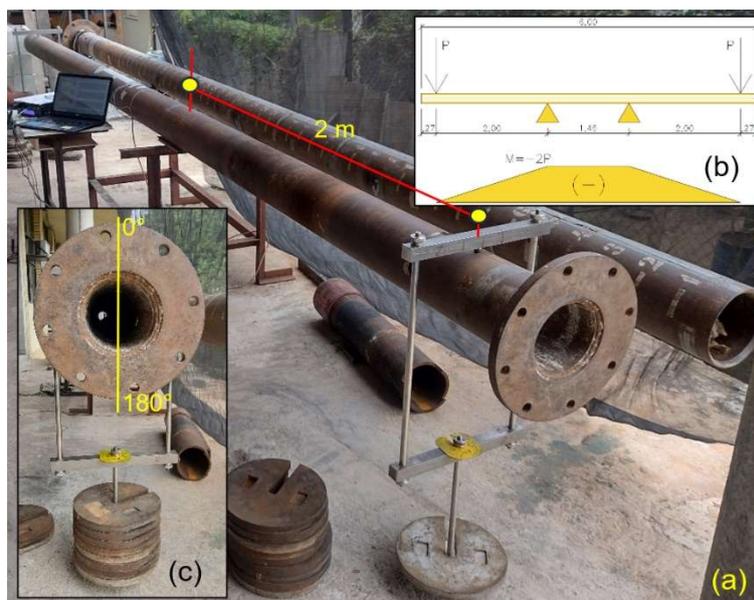


Figura 4. Execução dos testes em laboratório.

4 Resultados e Discussões

Para comparação dos resultados, os valores de *strain* obtidos nas duas faces do tubo, para os dois tipos de sensores (SG e FBG), foram subtraídos e um único valor (em módulo), por tipo de sensor, será apresentado. Tal procedimento é recomendado para compensar os efeitos de variação da temperatura ambiente durante o experimento (Werneck *et al.*, 2017), admitindo que a variação de temperatura é igual e seus efeitos ocorrem num único sentido em todo o tubo (dilatação ou contração). Apresentar-se-á também os valores teóricos de *strain* calculados a partir da expressão 3. A Figura 5 mostra dois dos três ciclos de carregamento e descarregamento com o tubo na posição 0°-180°, e a Figura 6 mostra os três ciclos com o tubo na posição 180°-0° (Figura 4c).

Com o aumento do momento fletor, houve um aumento das variações do *strain* nos sensores SG e FBG entre si, assim como do valor teórico calculado (Figuras 5 e 6). Exceto no caso dos ciclos para o tubo na posição 180°-0°, no qual percebe-se um maior percentual de não retorno ao zero entre ciclos subsequentes para os sensores FBG (Figura 8), as variações de *strain* para os sensores FBG situaram-se entre os valores teóricos e os para o SG. Tal fato pode estar associado a problemas de interface na colagem das sensores no tubo, devido às propriedades elásticas da cola utilizada.

Em geral, mesmo com essas diferenças nas variações de *strain* nos dois tipos de sensores (SG e FBG) e o valor teórico, porém consistentes no que se refere à proporcionalidade com o carregamento, considera-se os resultados satisfatórios para uma aplicação na instrumentação de

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





estacas, visto que calibrações diretas associadas às grandezas de engenharia (momento fletor, carga, etc.) transpassam tais problemas.

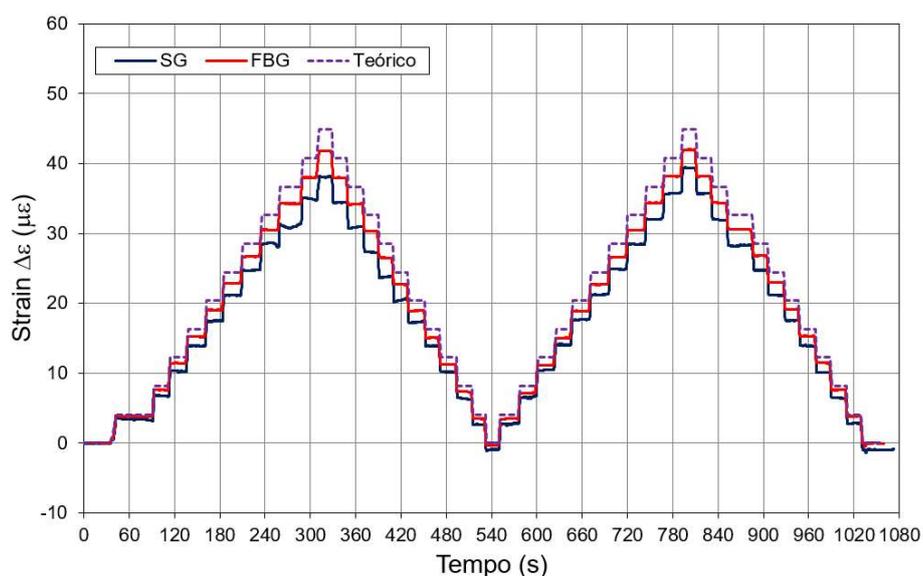


Figura 5. Ciclos 2 e 3 – tubo na posição 0°-180°.

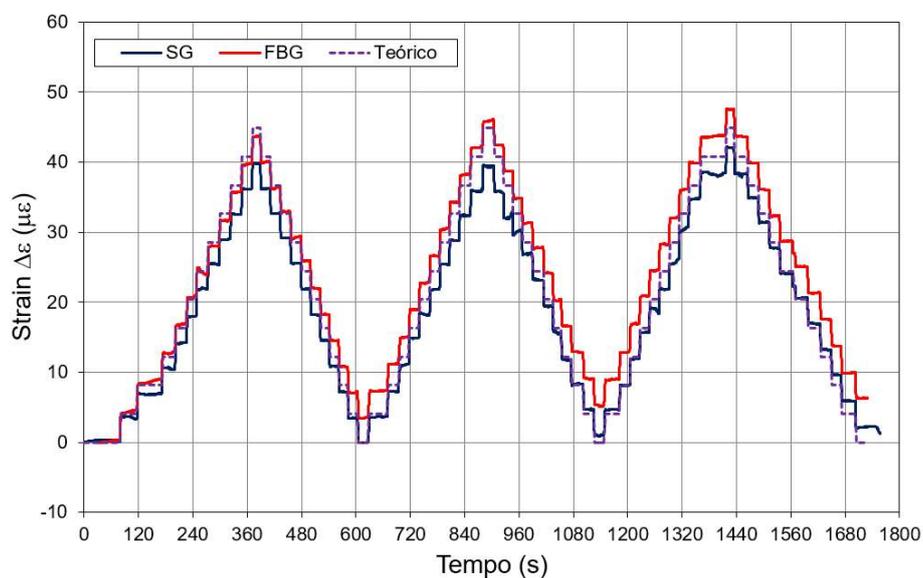


Figura 6. Ciclos 1, 2 e 3 – tubo na posição 180°-0°.

A Figura 7 apresenta as retas de calibração para o sensor SG e as respectivas constantes de conversão do *strain* medido em momento fletor, considerando os valores médios de *strain* nos patamares de carregamento ou descarregamento, por ciclo (ex. figuras 5 e 6). A Figura 8 apresenta o mesmo para os sensores FBG.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Realização:



Avenida Rebouças, 353, Sala 74 A
Cerqueira César, São Paulo/SP, 05401-900
Telefone: (11) 3052-1284
E-mail: abef@abef.org.br

Organização:



Avenida T-9, 2310 - Ed. Inove Intelligent Place
Sala B701, Jardim América, Goiânia/GO, 74255-220
E-mail: secretaria@qeeventos.com.br
Site: www.qeeventos.com.br

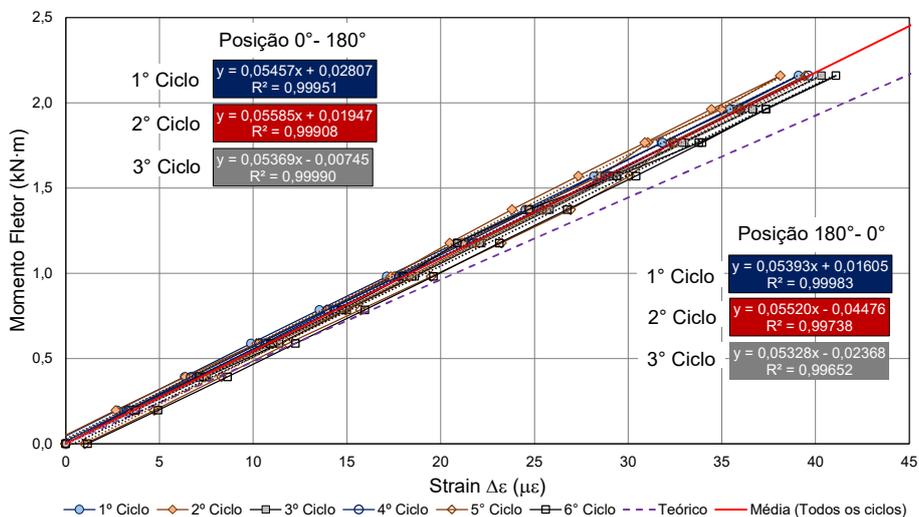


Figura 7. Retas de calibração do sensor *strain-gauge* (SG) por ciclo de carregamento.

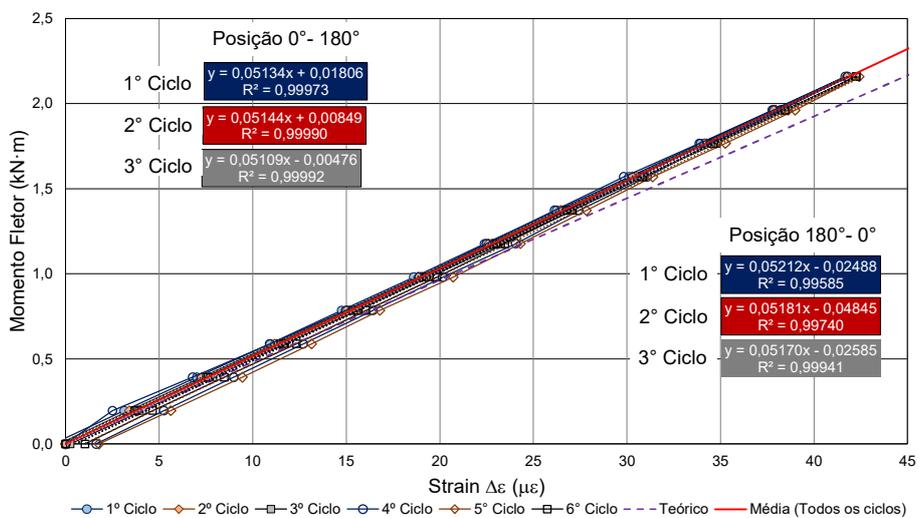


Figura 8. Retas de calibração dos sensores de rede Bragg (FBG) por ciclo de carregamento.

Analisando qualitativamente os gráficos das figuras 7 e 8, independentemente da posição do tubo (0°-180° ou 180°-0°), e sem entrar no rigor de uma análise de erro, pode-se dizer que as constantes de calibração para o sensor SG apresentaram maiores variações em torno da média (todos os ciclos), mesmo as retas de carregamento e descarregamento apresentando menores variações das constantes que no caso dos sensores FBG, que apresentaram as maiores diferenças de não retorno ao zero para os ciclos 4º, 5º e 6º. A Tabela 3 resume os resultados apresentados graficamente nas figuras 7 e 8.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Tabela 3. Constantes de calibração para os sensores SG e FBG

Ciclo	Strain-gauge (SG)				Fibra óptica – Rede Bragg (FBG)			
	C (kN.m/ μm)	D (kN.m/ μm)	Δ (%)	C e D (kN.m/ μm)	C (kN.m/ μm)	D (kN.m/ μm)	Δ (%)	C e D (kN.m/ μm)
1°	0,05520	0,05397	2,2	0,05457	0,05171	0,05101	1,4	0,05134
2°	0,05606	0,05579	0,5	0,05585	0,05165	0,05127	0,7	0,05144
3°	0,05370	0,05369	0,0	0,05369	0,05088	0,05136	1,0	0,05109
4°	0,05398	0,05395	0,1	0,05393	0,05104	0,05365	5,1	0,05212
5°	0,05476	0,05606	2,4	0,05520	0,05086	0,05314	4,5	0,05181
6°	0,05252	0,05422	3,2	0,05328	0,05100	0,05245	2,8	0,05170
Todos (kN.m/ μm)	0,05442				0,05158			

C = carregamento; D = descarregamento; $\Delta = \| C-D \| / C$

5 Considerações Finais

Dos resultados obtidos na comparação da performance de sensores *strain-gauge* (SG) e sensores de fibra óptica do tipo Rede Bragg (FBG), para aplicação em provas de carga de estacas metálicas instrumentadas e carregadas lateralmente, pode-se dizer que:

- ambos sensores tiveram desempenho semelhante para a obtenção dos momentos fletores aplicados na seção central da estaca-tubo teste, embora os sensores SG tenham apresentado maiores variações das constantes de calibração nos ciclos;
- as variações de não retorno ao zero foram maiores para os sensores FBG, conforme se vê na Figura 7, o que pode estar associado à colagem desses sensores, devido às propriedades elásticas da cola utilizada na interface com o tubo;
- sensores SG exigem uma quantidade de fios para conexão muito maior que os sensores FBG, os quais utilizam a própria fibra óptica como conexão. Somada à imunidade aos efeitos eletromagnéticos e descargas elétricas das fibras ópticas, a conexão simples, por uma única fibra para vários sensores é, talvez, a grande vantagem das FBGs;
- outros estudos de aplicação prática em instrumentação de provas de carga em estacas estão sendo desenvolvidos pelos laboratórios de Ensaios de Campo e Instrumentação (LACI) e de Instrumentação e Fotônica (LIF), ambos da COPPE/UFRJ. Os resultados oriundos dessas pesquisas serão divulgados em trabalhos futuros, incluindo provas de carga em um campo experimental de argila mole, com vários níveis de instrumentação na estaca, para carregamentos laterais e axiais;
- por fim, considera-se o uso de sensores de fibra óptica do tipo Rede Bragg (FBG) em estacas instrumentadas como uma alternativa enxuta, relativamente simples e substituta aos convencionais *strain-gauges*.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Falconi, F.F., Corrêa, C.N., Maset, V.L., (2016) Prova de carga estática prévia e instrumentada em estaca escavada de grande diâmetro na Baixada Santista. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: ABMS. p. 25-42.
- Lopes, F.R., (1986) Medições de transferência de carga em estacas. In: VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: ABMS. p. 25-42.
- Reese, L.C., Van Impe, W., (2011) *Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading*, 2nd., CRS Press, Leiden, The Netherlands, 532 p.
- Szymkiewicz, F., Minatchy, C., Reiffsteck, P., (2021) Static pile load tests: contribution of the measurement of strains by optical fiber. *International Journal of GEOMATE – Geotechnique, Construction Materials and Environment*, 20 (81), p.44-51. <https://doi.org/10.21660/2021.81.6330>
- Velloso, D.A., Lopes, F.R., (2002) *Fundações – Volume 2 – Fundações Profundas*, 1ª ed., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 472 p.
- Werneck, M.M., Allil, R.C.S.B., Nazaré, F.V.B., (2017) *Fiber Bragg Gratings – Theory, Fabrication, and Applications*, 1st., Spie Press, Bellingham, Washington, USA, 258 p.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

