

Extensômetros elétricos de resistência: definições e aplicações na construção civil

ANA CAROLINA SARAIVA CARDOSO*, EDUARDO CHAHUB**, JULIANA MOREIRA SENNA GUIMARÃES***, LUIZ ANTÔNIO MELGAÇO NUNES BRANCO****, TALITA DE SOUZA OLIVEIRA*****, CAMILA GONÇALVES ALVES PEREIRA***** , KENNED DE OLIVEIRA SANTOS*****

Uns dos avanços tecnológicos mais importantes na engenharia podem ser atribuídos aos ensaios não destrutivos, que investigam a sanidade dos materiais sem destruí-los ou introduzir quaisquer alterações em suas características. Os extensômetros elétricos de resistência são um componente de uma técnica de instrumentação não destrutiva para a análise experimental de tensões, com ampla aplicação na engenharia civil. Trata-se de um sensor elétrico cujo princípio de funcionamento é baseado na variação da resistência quando submetido a uma deformação. Essa variação de resistência pode ser medida com precisão e correlacionada com o valor da tensão aplicada e com a deformação resultante devido à mesma. O presente trabalho objetiva expor as definições e conceitos relacionados à técnica da extensometria, além de exemplificar sua aplicação na construção civil no caso do monitoramento de pontes e na medição de força aplicada aos parafusos em esforços de protensão.

Alguns dos avanços tecnológicos mais importantes na engenharia podem ser atribuídos aos ensaios não destrutivos, que investigam a sanidade dos materiais sem destruí-los ou introduzir quaisquer alterações em suas características. O competitivo mercado atual exige que os projetos reduzam seus custos primando pela qualidade. Segundo Weber (2008), os extensômetros elétricos de resistência são um componente de uma técnica de instrumentação não destrutiva para a análise experimental de tensões, com ampla aplicação na engenharia civil. Pode-se citar como exemplo de aplicação dessa técnica a inspeção e monitoramento de estruturas, assim como na obtenção de parâmetros essenciais para o cálculo estrutural. Neste contexto, o presente trabalho objetiva expor as definições e conceitos relacionados à técnica da extensometria, além de exemplificar sua aplicação na construção civil.

REFERENCIAL TEÓRICO

Diversos procedimentos e equipamentos foram criados com o intuito de medir as deformações. Os primeiros aparelhos eram essencialmente mecânicos, apresentando limitações e erros de medição. As avaliações dos esforços baseiam-se nas descobertas de Robert Hooke (1678), que relacionam os esforços aplicados, através da tensão gerada no material σ , com a deformação resultante ϵ , pela Lei de Hooke ($\sigma = E \times \epsilon$), sendo E o módulo de Elasticidade.

Se um dado material é tracionado, a força aplicada no material é proporcional à deformação causada na região elástica, mantendo uma relação constante entre a magnitude da força externa e a quantidade de deformação. Isto implica no fato de que a força para contrabalançar a ação externa é gerada internamente no material, e a magnitude de força por unidade de área é chamada de tensão. A tensão é um vetor, tendo uma magnitude

e uma direção e expressa em termos de kgf/cm² ou qualquer outra relação de força por unidade de área. Como símbolo para tensão tem-se σ , usado para indicar tensões verticais, e τ para tensões cisalhantes.

Comumente os materiais têm a propriedade de se alongar quando tracionados e de encolher quando comprimidos. Suponha que um material é tracionado, e a quantidade de alongamento seja dada por Δl enquanto que o comprimento original seja l. A relação de alongamento $\Delta l / l$ é chamada deformação não apresentando dimensão. Assim, a deformação pode ser expressa pela equação 1.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

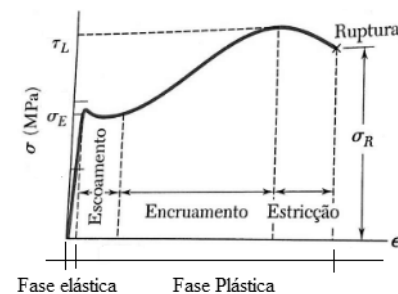
A figura 1 mostra a relação entre tensão e deformação de um corpo de prova de aço submetido a um carregamento de tração. A tensão é proporcional à deformação entre a origem e o ponto σ_E onde uma inclinação aproximadamente linear é obtida. Esta é a chamada região elástica onde se aplicam as leis de Hooke. A relação tensão-deformação na região elástica é dada pela equação (2).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2)$$

Onde E é uma constante de proporcionalidade, a qual é referida como módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young.

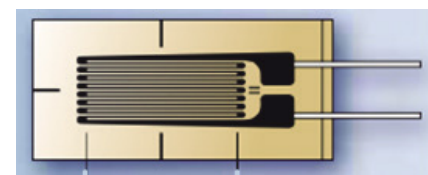
EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA

O extensômetro resistivo trata-se de um sensor elétrico cujo princípio de funcionamento é baseado na variação da resistência quando submetido a uma deformação. Essa variação de resistência pode ser medida com precisão e correlacionada com o valor da tensão aplicada e com a deformação resultante devido à mesma (Ribbler, 2010). A figura 2 representa um "straingage" linear típico.



Fonte: Beer, Jhanson, DeWolf, & Mazurel, 2011

Figura 1 - Curva tensão-deformação de material dúctil



Fonte: HBM, 2016

Figura 2 - Straingage linear típico

A constante que relaciona a sensibilidade do extensômetro à deformação é chamada de fator de medida ou "gage factor". Gage factor é definido como sendo a razão da mudança na fracionária na resistência elétrica e da mudança fracionária do comprimento, como descrito na equação 3.

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R_G}}{\epsilon} \quad (3)$$

Onde:

ΔR = Mudança na resistência causada pela deformação;

R_G = Resistência do "straingage" não deformado; e ϵ = Deformação.

Extensômetros constituem-se essencialmente de uma grade metálica sensível, ligada a uma base que se cola à peça ou estrutura que se deseja monitorar (Younis; Kang, 2010). O fio sensível tem, na maioria dos extensômetros, um diâmetro aproximado de 0,01mm e é constituído por ligas metálicas especiais (por exemplo, uma liga com 55% de cobre e 45% de níquel). A grade fica embudada entre duas folhas de papel ou dentro de uma fina película de plástico. Nas extremidades do fio sensível estão soldados dois outros de maior diâmetro que constituem o elemento de ligação do extensômetro ao circuito de medição (estas extremidades são denominadas de abas do extensômetro).

Na literatura encontramos quatro tipos principais de extensômetros, que se diferem de acordo com o seu princípio de funcionamento, são eles: extensômetro mecânico, ex-

tensômetro óptico, extensômetro acústico e extensômetro elétrico resistivo, também denominado extensômetro elétrico. Este último é um dos mais utilizados atualmente e funciona a partir da mudança de resistência elétrica dos metais quando sofrem deformações.

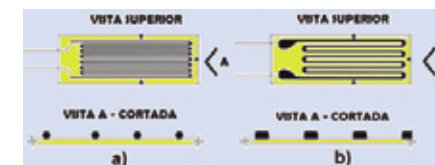
Os extensômetros elétricos podem ser diferenciados principalmente quanto aos seguintes aspectos: material e forma do elemento resistivo, geometria da grade e o valor da resistência empregada. Na figura 3, apresentam-se dois tipos de extensômetro, o com elemento resistivo tipo fio e com elemento tipo lâmina. Outra distinção possível é quanto à liga metálica empregada nos fios ou lâminas. A liga varia em relação aos elementos utilizados e à porcentagem de cada metal empregado.

A geometria da grade de resistências apresenta grande variedade, distinguindo-se umas das outras de acordo com a necessidade de medição específica. Na figura 4, são exemplificados alguns dos tipos de geometria de extensômetros encontrados no mercado. Em relação à resistência empregada, de acordo com Weber (2008), normalmente possuem 120, 350 ou 600 Ohms, sendo mais comuns as de 120 e 350 Ohms.

Os extensômetros lineares medem a deformação em uma única direção. Os de roseta dupla são adequados para análises de tensões biaxiais quando é conhecida a direção da deformação principal; os extensômetros de roseta tripla são adequados para análise de tensões biaxiais, quando é desconhecida a direção da deformação principal.

Para que o extensômetro deforme em mesmas proporções do corpo em teste, ele deve ser colado corretamente. Isto implica dizer que o material utilizado na colagem deve ser adequado ao seu uso e que a superfície deve estar limpa garantindo a ausência de graxas, óleos ou material pulverulento.

Dentre os diversos tipos de colas podemos elencar quatro características principais para a sua escolha. Primeiramente deve-se observar o intervalo de pressão de colagem que o material pode ser submetido. A condição de endurecimento da cola, o que inclui o seu tempo de colagem em relação à temperatura de aplicação e a



Fonte: Modificação JÚNIOR; PERTENCE, 2010

Figura 3 - Tipos de extensômetro em relação à forma do elemento resistivo: a) extensômetro tipo fio; b) extensômetro tipo lâmina



Fonte: HBM, 2016

Figura 4 - Tipos de extensômetros elétricos: a) Linear; b) Roseta dupla; c) Roseta tripla; d) Diafragma

faixa de temperatura de operação da colagem, são outros dois fatores relevantes à tomada de decisão. E por fim deve-se atentar às condições de estocagem para que a cola não perca suas características ao sofrer um armazenamento inadequado. Segundo Mallerba; Guarneri; Barros (2008), de maneira geral, quando se deseja uma instrumentação de curto prazo e onde a temperatura de trabalho é a temperatura ambiente, ou sem grandes variações de temperatura, pode-se utilizar adesivos como a MBOND 200, mais conhecida como "SuperBonder", que apresenta baixo custo e instalação simplificada.

EXPERIMENTAÇÃO

Para a experimentação utilizando extensômetros elétricos de resistência é fundamental a concepção correta do modelo matemático. Esse modelo contempla a trans-



Fonte: Adaptação Lynks, 2017

Figura 5 - Equipamento para a aquisição de sinais dos straingages



Fonte: Lima, 2008

Figura 6 - Vista geral da ponte Michigan Street Bridge

formação da situação real que se pretende analisar em um modelo descrito através de equações matemáticas que representam os processos que ocorrem no sistema. Essa análise tem o objetivo de guiar a aplicação dos extensômetros. Diversas questões devem ser consideradas a fim de evitar erros de medidas obtidas pela extensometria. Segundo Grante (2004), não há um extensômetro que é completamente perfeito para analisar uma determinada questão. Cabe ao engenheiro de instrumentação escolher qual extensômetro se aplica melhor à situação analisada. Muitos problemas podem ser solucionados com os tipos mais usuais de extensômetros dentro dos mais de 2 000 tipos disponíveis no mercado, sem precisar recorrer à utilização de extensômetros especiais, que são mais caros do que os usuais.

A seleção do tipo de extensômetro a ser empregado depende do estado de tensão que a estrutura a ser analisada está submetida, topografia dos pontos de medição, natureza do carregamento, duração da medição, temperatura do ensaio, temperatura da estrutura à qual o extensômetro é instalado, distúrbios como presença de umidade, óleo e impurezas na superfície de aplicação (Andolfato; Camacho; Brito, 2004).

É importante o conhecimento das possíveis fontes de erro para que as medidas determinadas pela instrumentação sejam coerentes com a situação analisada. Podem ocorrer erros nos resultados provenientes das medições com extensômetros, se o objeto de medição, o “strain-gage”, estiver velho ou danificado, se foi instalado de forma incorreta ou se está sobre uma superfície irregular. Neste último caso, o erro acontece devido ao fato de que as deformações medidas são menores do que as deformações reais (Younis; Kang, 2010). Pode ocorrer influência da temperatura e umidade do ambiente e da superfície de medição, além dos erros poderem ser causados por alguma influência do operador que não seja condizente com os procedimentos da instrumentação (Weber, 2008).

Para o procedimento da medição de tensões, deformações, ou torque de uma estrutura utilizando os extensômetros elétricos de resistência, além do “strain-gage” adequado para a situação de medição é necessária a uti-

lização de outros equipamentos (figura 5). As variações físicas captadas pelos “strain-gages” são convertidas em sinais e impulsos elétricos, que passam pelos condicionadores de sinais, circuitos eletrônicos que adequam os sinais analógicos para a conversão digital. O conversor analógico para digital é o elemento responsável por traduzir uma grandeza elétrica numa representação numérica adequada ao tratamento digital do sinal adquirido. Por último esses sinais são transferidos para o programa de aquisição de dados, responsável pelo controle do sistema, permitindo ao usuário parametrizar, comandar e monitorar o processo de aquisição de dados. Os programas de aquisição de dados armazenam os sinais captados na forma de arquivos que podem ser consultados posteriormente com o auxílio de um computador, fazendo o uso de softwares específicos para gerar relatórios, gráficos e outras documentações que podem ser impressas (Andolfato; Camacho; Brito, 2004).

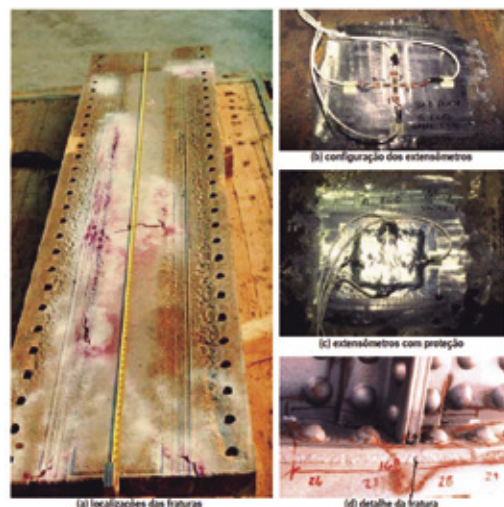
APLICAÇÕES

A extensometria é um procedimento eficiente para avaliar a distribuição de tensão e deformações decorrentes de variação de temperaturas. Os valores das expansões e retrações provocadas pela variação de temperatura podem ser determinados por “strain-gages”, refletindo o comportamento de expansão ou contração térmica linear. A tensão causada pela ação da temperatura pode ser transformada em um sinal elétrico de alta precisão (Tang et al., 2014). “Strain-gages” também são eficientes para a medição de cargas, deslocamentos, rotações e deflexões em uma ampla gama de estruturas civis.

Nas últimas décadas, houve um grande impulso no número de estruturas de engenharia civil como pontes e túneis. O presente item pretende expor a aplicação desse procedimento para o monitoramento de pontes e para a medição de força aplicada em parafusos de protensão.

MONITORAMENTO DE PONTES

Um dos objetivos do monitoramento de pontes é a verificação de projeto que consiste na aquisição de dados referentes ao comportamento dinâmico para verificar considerações utilizadas na caracterização de ventos fortes e terremotos, fornecimento de informações a serem utilizadas em projetos futuros mais racionais e desenvolvimento de um sistema de monitoramento com controle



Fonte: Lima, 2008

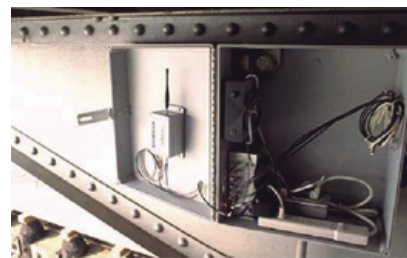
Figura 7 - Detalhes da instrumentação e fissuras ocorridas na estrutura

automático para eventuais avisos em situações mais críticas.

Pode ser mencionado como objetivo também a manutenção estrutural, que consiste na aquisição de dados para análise e avaliação do funcionamento da estrutura da ponte, detecção de possível deterioração estrutural e evolução da degradação.

Como outro objetivo tem-se o gerenciamento do tráfego que consiste no fornecimento de dados para controle dos níveis de segurança para o tráfego seguro de veículos quando a ponte está submetida a ventos fortes ou tremores de terra, obtenção de dados para avaliação estrutural após um tremor de terra ou um tufão para liberação da utilização da ponte.

O caso a seguir aborda a ponte de Michigan Street Bridge (figura 6). A instrumentação da ponte treliçada, realizada com a utilização de extensômetros e inclinômetros, teve como principal objetivo avaliar a propagação de trincas em pontos específicos da ponte (figura 7), principalmente próximo da parte da ponte que é suspensa para passagem de navios, em soldas que foram reparadas 39 anos atrás. Neste caso, cada



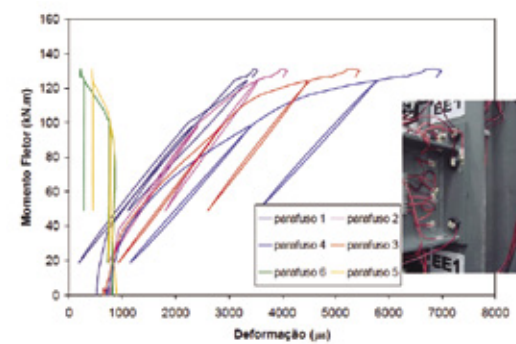
Fonte: Lima, 2008

Figura 8 - Sistema para monitoramento remoto da ponte metálica



Fonte: Lima, 2008

Figura 9 - Instalação de extensômetros em parafusos



Fonte: Lima, 2008

Gráfico 1 - Deformações medidas nos parafusos

região instrumentada era conectada a um computador que era ligado a um computador central, que, através de uma conexão via modem, permitia o acesso remoto aos dados (figura 8).

Foram encontradas deformações máximas da ordem de 1000 µε e observada uma deformação permanente, após este pico, 200 µε indicando uma possibilidade de dano nesta região e distorção permanente da peça analisada.

MEDIÇÃO DE FORÇA APLICADA AOS PARAFUSOS EM ESFORÇOS DE PROTENSÃO

Outro método para avaliação do momento fletor aplicado à ligação consiste na avaliação da força aplicada aos parafusos através da instalação de extensômetros internos nos parafusos, tipo BTM (marca TML). Todavia, o processo de instalação destes extensômetros é bastante trabalhoso consistindo na realização das seguintes etapas, conforme figura 9.

- Furação dos parafusos com uma broca com φ=3mm e profundidade superior a 36mm;
- limpeza interna do furo para evitar que as impurezas prejudiquem a aderência da cola;
- preparação da cola → proporção de uma

parte de substância A para cada dez partes da substância B;

- injeção da cola no orifício feito no parafuso e introdução do extensômetro;

• finalmente, aquece-se o parafuso a uma temperatura de 140°C durante duas horas e aguardam-se mais dez horas em temperatura ambiente até que o parafuso esteja pronto para ser utilizado.

Os resultados encontrados no protótipo descrito na figura 9 foram demonstrados no gráfico 1.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Percebe-se que os extensômetros são muito utilizados devido à precisão e versatilidade. Podem ser utilizados em laboratório ou no campo, em aplicações delicadas (por exemplo, células de carga para balanças de precisão) ou grosseiras (por exemplo, serviços pesados da indústria petrolífera). Trata-se de um método quantitativo superficial pontual e que pode ser utilizado em aplicações estáticas ou dinâmicas.

Assim, a seleção do extensômetro apropriado para determinada aplicação é influenciada pelo material da grade metálica e sua construção, pelo material do suporte isolante, pelo material do adesivo, pelo tratamento e proteção do medidor e pela configuração. A sensibilidade à temperatura é um ponto fundamental no uso de extensômetro, e frequentemente o circuito de medição contém um compensador de temperatura.

Com isso, o extensômetro apresenta um excelente custo/benefício na medição de

variações de carga, pressão, torque, deslocamento, tensão (tração e compressão), aceleração ou vibração. ☞

* **Ana Carolina Saraiva Cardoso**, mestranda em Construção Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais
E-mail: carolsaraivacardoso@yahoo.com.br

** **Eduardo Chahub**, doutor professor do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.
E-mail: echahud@gmail.com

*** **Juliana Moreira Senna Guimarães**, mestranda em Processos Construtivos pela Universidade FUMEC
E-mail: juliana.msquimaraes@gmail.com

**** **Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco**, doutor professor do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais
E-mail: luizmelg@gmail.com

***** **Talita de Souza Oliveira**, graduada em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix
E-mail: talitasooliveira@yahoo.com.br

***** **Camila Gonçalves Alves Pereira**, mestranda em Construção Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais
E-mail: camilagalves2004@hotmail.com

***** **Kenned de Oliveira Santos**, graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais
E-mail: kennedsantos@yahoo.com.br

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, 3ª edição, Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
 [2] ALMEIDA, P.A.D.O. - Introdução à extensometria elétrica de resistência. São Paulo: [s.n.], 1996.
 [3] ANDOLFATO, R.P.; CAMACHO, J.S.; BRITO, G.A.D. - Extensometria Básica. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2004. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>. Acesso em: 02 maio, 2017.
 [4] BEER, F.P. ET AL. - Mecânica dos Materiais. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2011.
 [5] FERNANDES, H. H. F. - Aplicação de um modelo de dano isotrópico escalar na análise de vigas parede de concreto armado. xvi, 85 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
 [6] GRANTE - Apostila de extensometria. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004. Disponível em: <http://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf>. Acesso em: 02 maio 2017.
 [7] RIBBLER, R.C. - Resistência dos Materiais. São Paulo: Pearson, 2010.
 [8] HOFFMANN, K. - An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges. HBM Test and Measurement. Disponível em: <https://www.hbm.com>. Acesso em: maio 2017.
 [9] LIMA, L.R.O. - Análise experimental de tensões. 2008. Notas de aula - UERJ, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: www.labciv.eng.uerj.br/rm4/. Acesso em: 22 maio 2017.
 [10] MALERBA, P.C.C.; GUARNIERI, F.L.; BARROS, J. - Aplicação da extensometria através de strain-gage: elaboração de uma célula de carga com sistema de aquisição de dados computadorizado da Universidade do Vale do Paraíba. In: XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, 2008, São José dos Campos (SP).
 [11] PERTENCE, A.E.M.; PERTENCE JÚNIOR, A. - Extensômetros em Engenharia Civil: Teoria e Aplicações. Construindo, Belo Horizonte, v.2, n.1, p.24-26, 2010. Semestral.
 [12] TANG, K. ET AL. - Measurement of thermal expansion at low temperatures using the strain gage method. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A: Applied Physics & Engineering, 2014. 323-329.
 [13] WEBER, A.L. - Extensometria Instrumentação. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, p. 1-16. 2008.
 [14] YOUNIS, N.T.; KANG, B. - Averaging effects of a strain gage. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010. 163-169.