

CAPÍTULO 6 Análise Experimental de Tensões

Introdução

As várias técnicas de análise experimental de tensões e deformações encontram uso generalizado tanto em pesquisa quanto na avaliação de estruturas já existentes. Com relação ao projeto de estruturas, a análise experimental de tensões é utilizada em diversas etapas tais como:

- a) pré-projeto
- b) desenvolvimento do projeto e sua otimização
- c) testes com modelos e protótipos
- d) testes de aceitação dos produtos
- e) análise de falhas

Dentre as diversas técnicas utilizadas para análise experimental de tensões, provavelmente, a mais utilizada atualmente diz respeito à utilização de extensômetros (strain-gages) para obtenção de deformações e conseqüentemente, tensões atuantes em uma estrutura.

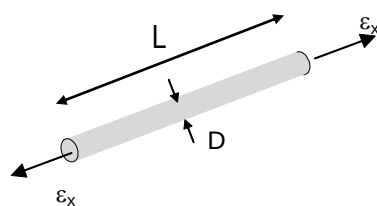
Esta técnica é muito utilizada devido à precisão, versatilidade e uma razoável relação custo/benefício. Pode ser utilizada em laboratório ou no campo, em aplicações delicadas (por exemplo, células-de-carga para balanças de precisão) ou grosseiras (por exemplo, serviços pesados da indústria petrolífera). Trata-se de um método quantitativo, superficial, pontual e que pode ser utilizado em aplicações estáticas ou dinâmicas.

Apesar de existirem extensômetros mecânicos (muito utilizados na obtenção do módulo de elasticidade em ensaios de tração de corpos-de-prova), óticos (utilização de laser) e acústicos, os mais utilizados são os extensômetros elétricos.

Extensômetros Elétricos

Origem

Em 1856 William Thomson, ou conhecido como Lord Kelvin, apresentou à Royal Philosophical Society de Londres os resultados de um experimento envolvendo a resistência elétrica do cobre e ferro quando submetidos a tensões. As observações de Kelvin foram consistentes com a relação entre resistência elétrica e algumas propriedades físicas de um condutor, segundo a equação:



$$\epsilon_x = \frac{dL}{L} \text{ e } R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (1)$$

onde R é a resistência elétrica, ρ é a resistividade, L é o comprimento do condutor e A é a área da seção transversal deste.

Derivando-se a equação anterior e dividindo-se por R, tem-se,

$$dR = \frac{L}{A} d\rho + \frac{\rho}{A} dL + \left(-\frac{L\rho}{A^2} dA \right) \rightarrow \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2)$$

O termo dA representa a mudança na seção transversal devido às deformações que são iguais a $-\nu dL/L$. Logo, $dA = \frac{\pi}{2} D dD$ e $\frac{dA}{A} = \frac{2dD}{D} = 2\varepsilon_y = -2\nu \varepsilon_x = -2\nu \frac{dL}{L}$ e a equação 2 pode ser reescrita conforme abaixo:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} (1 + 2\nu) \quad (3)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \varepsilon (1 + 2\nu) \rightarrow \frac{\Delta R}{R} = S_a \varepsilon \quad (4)$$

onde S_a representa a sensibilidade à deformação do material.

Entre 1937 e 1939, Edward Simmons (California Institute of Technology, - Pasadena, CA, USA) e Arthur Ruge (Massachusetts Institute of Technology - Cambridge, MA, USA) trabalhando independentemente um do outro, utilizaram pela primeira vez fios metálicos colados à superfície de um corpo de prova para medida de deformações. Esta experiência deu origem aos extensômetros de resistência elétrica (ERE) que são utilizados atualmente. A (**Figura 6.1**) mostra uma construção geral de um extensômetro à base de fio colado.

A partir de 1950, o processo de fabricação de extensômetros adotou o método de manufaturar finas folhas ou lâminas contendo um labirinto ou grade metálica, colado a um suporte flexível feito geralmente de epóxi (**Figura 6.2**).

As técnicas de fabricação de circuitos impressos são usadas na confecção dessas lâminas, que podem ter configurações bastante variadas e intrincadas, como mostra a (**Figura 6.3**). Nesta figura, o extensômetro apresentado em (a) é utilizado quando se conhece a direção da deformação, que é em um único sentido. A figura (b) apresenta um roseta de 2 direções (0° e 90°) que é caracterizada pela utilização de dois extensômetros sobre uma mesma base. Na letra (c), uma roseta de 3 direções é apresentada, sendo formada por três extensômetros. Este tipo de extensômetro é muito utilizado quando se deseja obter as tensões principais de um determinado ponto da estrutura. A figura (d) apresenta um extensômetro tipo diafragma formado por quatro extensômetros sobre uma mesma base, sensíveis a deformações em duas posições diferentes. Este tipo de extensômetro é usado em transdutores de pressão. A figura (e) apresenta um extensômetro para medida de tensão residual que são três extensômetros sobre uma base devidamente posicionados. Finalmente, a figura (f) mostra um extensômetro para ser utilizado em parafusos de ligações aparafusadas.

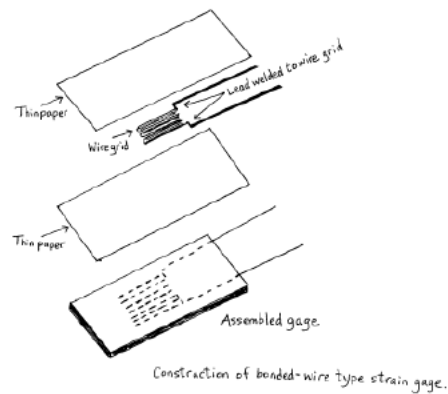


Figura 1 – Fabricação de um extensômetro de resistência elétrica

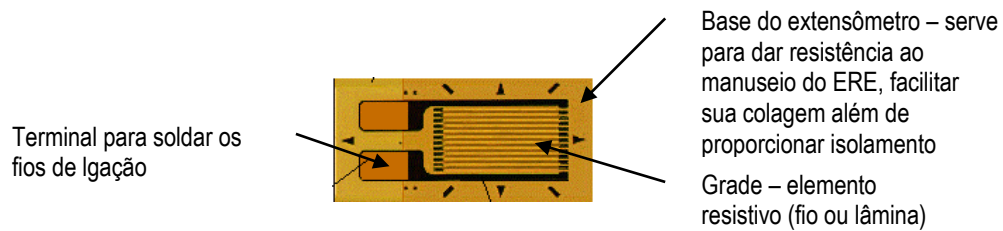


Figura 2 – Diagrama de um extensômetro de resistência elétrica

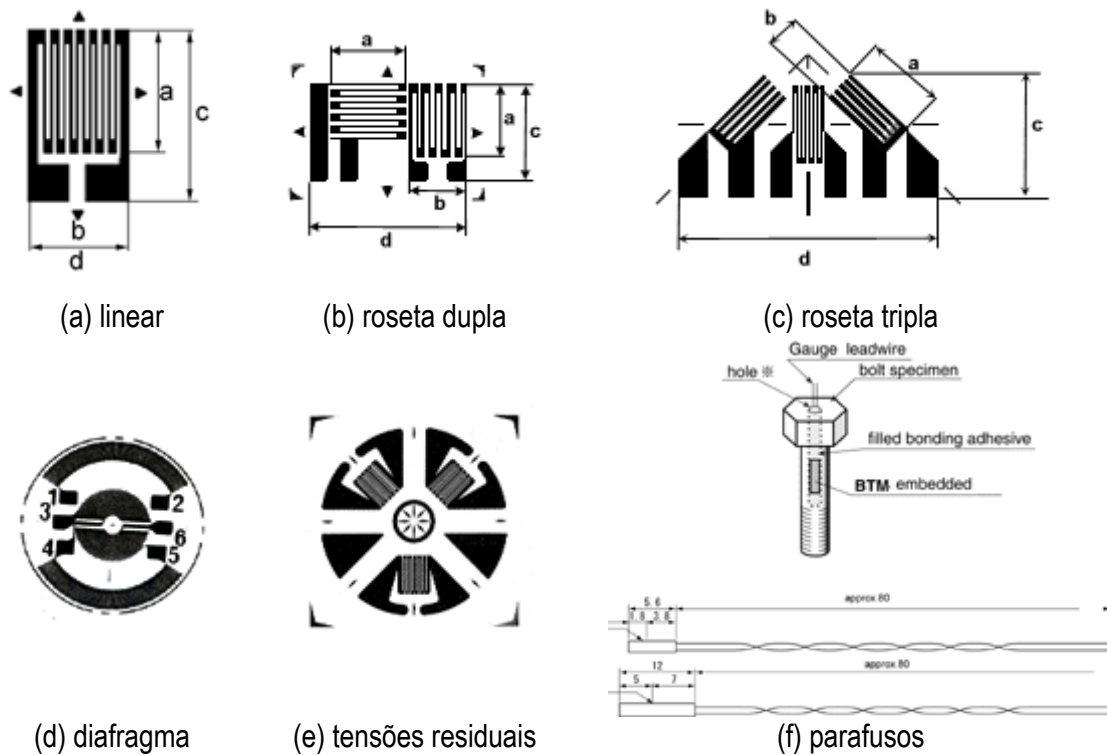
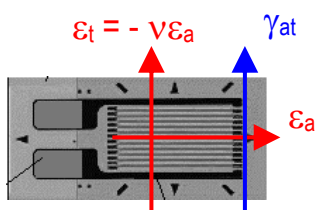


Figura 3 – Tipos de extensômetros elétricos

Por que os extensômetros são fabricados com uma grade (vários fios ligados entre si) e não com um fio apenas?

Para maior facilidade de medição de ΔR , R deve possuir um valor elevado. Para extensômetros comuns, $R = 120\Omega$. Observando-se a equação (1), verifica-se que este valor somente é atingido com um comprimento L elevado já que a área A do condutor é muito pequena. Por este motivo, os extensômetros são fabricados colocando-se vários fios em paralelo, ligados pelas extremidades.

Todavia, estes terminais de soldagem nas extremidades de cada “fio” acarretam alguma sensibilidade transversal.



$$\frac{\Delta R}{R} = S_a \varepsilon_a + S_t \varepsilon_t + S_{at} \gamma_{at} \quad (5)$$

Geralmente, S_{at} é muito pequena e pode ser desprezada.

$$\frac{\Delta R}{R} = S_a (\varepsilon_a + K_t \varepsilon_t) \quad (6)$$

onde

$$K_t = \frac{S_t}{S_a} \quad (7)$$

Através da equação (6), obtém-se a relação básica entre a deformação e a variação na resistência do extensômetro elétrico sendo expressa por:

$$\varepsilon = \frac{1}{S_g} \frac{\Delta R}{R} \quad (8)$$

onde ε é a deformação, S_g é uma constante de fabricação do ERE e R é a resistência do extensômetro. Para um extensômetro típico, $S_g = 2.0$ e R é 120Ω .

Princípio de Funcionamento

Pequenas variações de dimensões da estrutura são então transmitidas mecanicamente ao extensômetro, que transforma essas variações em variações equivalentes de sua resistência elétrica (por esta razão, os extensômetros são definidos como transdutores).

Os extensômetros são usados para medir variações de carga, pressão, torque, deslocamento, tensão (tração e compressão), aceleração, vibração. A seleção do extensômetro apropriado para determinada aplicação é influenciada pelas características seguintes: material da grade metálica e sua construção, material do suporte isolante, material do adesivo, tratamento e proteção do medidor e configuração. A sensibilidade à temperatura é um ponto fundamental

no uso de extensômetro, e freqüentemente o circuito de medição contém um compensador de temperatura.

Da mesma forma, o tipo de adesivo (epóxi ou cianoacrilatos) usado para fixar o extensômetro à estrutura a ser monitorada é de suma importância. O adesivo deve transmitir as variações mecânicas com o mínimo de interferência possível, por isso deve ter alta resistência mecânica, alta resistência ao cisalhamento, resistência dielétrica e capacidade de adesão, baixa restrição de temperatura e facilidade de aplicação.

Processo de Instalação dos Extensômetros

Extensômetros de chapas

- Marcação da posição onde o extensômetro será instalado;
- Lixar a superfície com uma lixa média até q apareça o aço;
- Lixar a superfície com uma lixa muito fina até ficar perfeitamente lisa;
- Marcar novamente a poisição do extensômetro;
- Limpar a região onde o extensômetro será colado com acetona para que impurezas não prejudiquem a aderência da cola;
- Com um pedaço de fita “durex”, colar o extensômetro com a resistência para cima, puxando-o vagarosamente para que a cola seja colocada na base do mesmo;
- Pressionar o extensômetro por cima da fita “durex” por um tempo razoável;
- Retirar a fita “durex”;
- Colagem do material isolante para apoio dos “chicotes”;
- Soldagem dos “chicotes” para posterior ligação no equipamento de aquisição de dados.
- Colocação da pasta (borracha) isolante para proteger o extensômetro.



Figura 4 – Instalação de extensômetros em chapas

Extensômetros de parafusos

- Furação dos parafusos com uma broca com $\varnothing=3\text{mm}$ 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 aguarda-se mais dez horas em temperatura ambiente até que o parafuso esteja pronto para ser utilizado.



(a) furação



(b) preparação da cola



(c) injeção da cola



(d) colocação



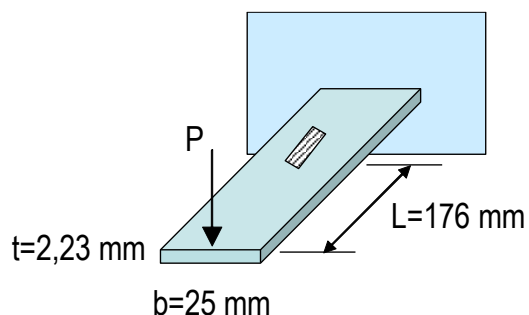
(e) parafuso instrumentado

Figura 5 – Instalação de extensômetros em parafusos

Exemplos Básicos - Resistência dos Materiais

Existem diversos exemplos onde o uso de extensômetros elétricos podem auxiliar o entendimento de alguns fenômenos da resistência dos materiais como torção, flexão, tração, compressão, etc.

Viga engastada e livre



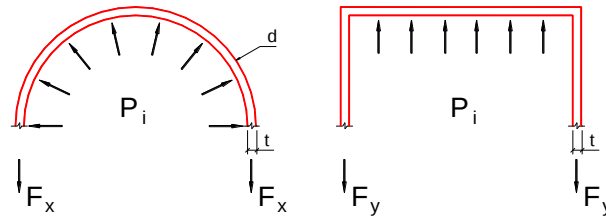
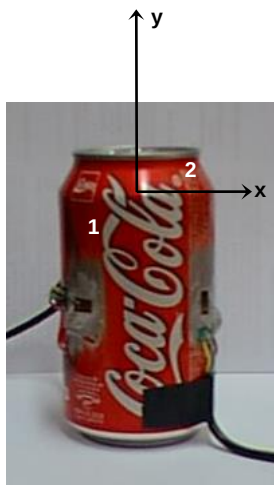
$$M = P \cdot L \text{ e } \sigma = E \cdot \epsilon$$

$$E \cdot \epsilon = \frac{M \cdot c}{I} \Rightarrow \epsilon = \frac{P \cdot L \cdot t / 2}{E \cdot b \cdot t^3 / 12} = \frac{6 \cdot P \cdot L}{b \cdot t^2 \cdot E}$$

$$\text{Para } P = 0,350 \text{ g} \rightarrow \epsilon = 146 \mu\epsilon$$

$$\text{Pelo extensômetro} \rightarrow \epsilon = 147 \mu\epsilon$$

Lata de “Coca-Cola”



- deformação na direção circunferencial x:

$$\varepsilon_x = 1562 \mu\varepsilon$$

- deformação na direção circunferencial y:

$$\varepsilon_y = 379 \mu\varepsilon$$

- pressão interna:

$$P_i = \varepsilon'_x \cdot \frac{4E}{d(2-\nu)} = P_i = 1562 \times 10^{-6} \cdot \frac{4 \times 0,12 \times 70000}{60,0(2-0,3)} = 5,14 \text{ kgf/cm}^2$$

Exemplos de Aplicações em Estruturas

Muitos são os exemplos de utilização de extensômetros elétricos em estruturas de aço, tanto no controle de estruturas existentes, como em ensaios de protótipos em laboratório. A seguir, apresentam-se alguns exemplos clássicos de utilização destes extensômetros em estruturas de aço.

Monitoramento de Pontes Metálicas

Dentre os principais objetivos do monitoramento de pontes são:

1. Verificação de Projeto:
 - a. Aquisição de dados referentes ao comportamento dinâmico para verificar considerações utilizadas na caracterização de ventos fortes e terremotos;
 - b. Fornecimento de informações a serem utilizadas em projetos futuros mais racionais;
 - c. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento com controle automático para eventuais avisos em situações mais críticas.
2. Manutenção Estrutural:
 - a. Aquisição de dados para análise e avaliação do funcionamento da estrutura da ponte;
 - b. Detecção de possível deterioração estrutural e evolução da degradação;
3. Gerenciamento do Tráfego:

- a. 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;
- b. Fornecimento de dados para avaliação estrutural após um tremor de terra ou um tufão para liberação da utilização da ponte.

Caso 1 - Michigan Street Bridge

(<http://iti.birl.northwestern.edu/edc/history/prinefish.pdf>)

Neste caso, 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, principalmente próximo da parte da ponte que é suspensa para passagem de navios, em soldas que foram reparadas a 39 anos atrás. Neste caso, cada região instrumentada era conectada a um computador, ligado a um computador central que através de uma conexão via modem, permitia o acesso remoto aos dados.



Figura 6 – Vista geral da “Michigan Street Bridge”

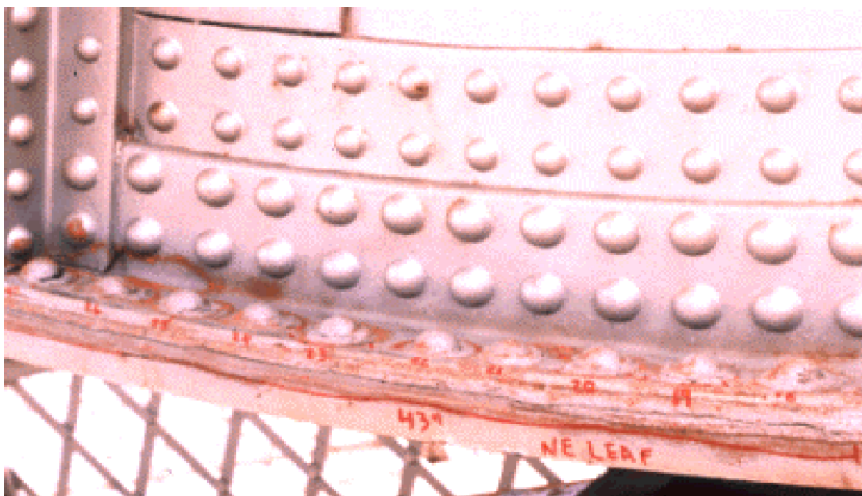


Figura 7 – Ruptura da solda efetuada no campo

UERJ – FEN – ESTR - Resistência dos Materiais IV – Luciano Lima

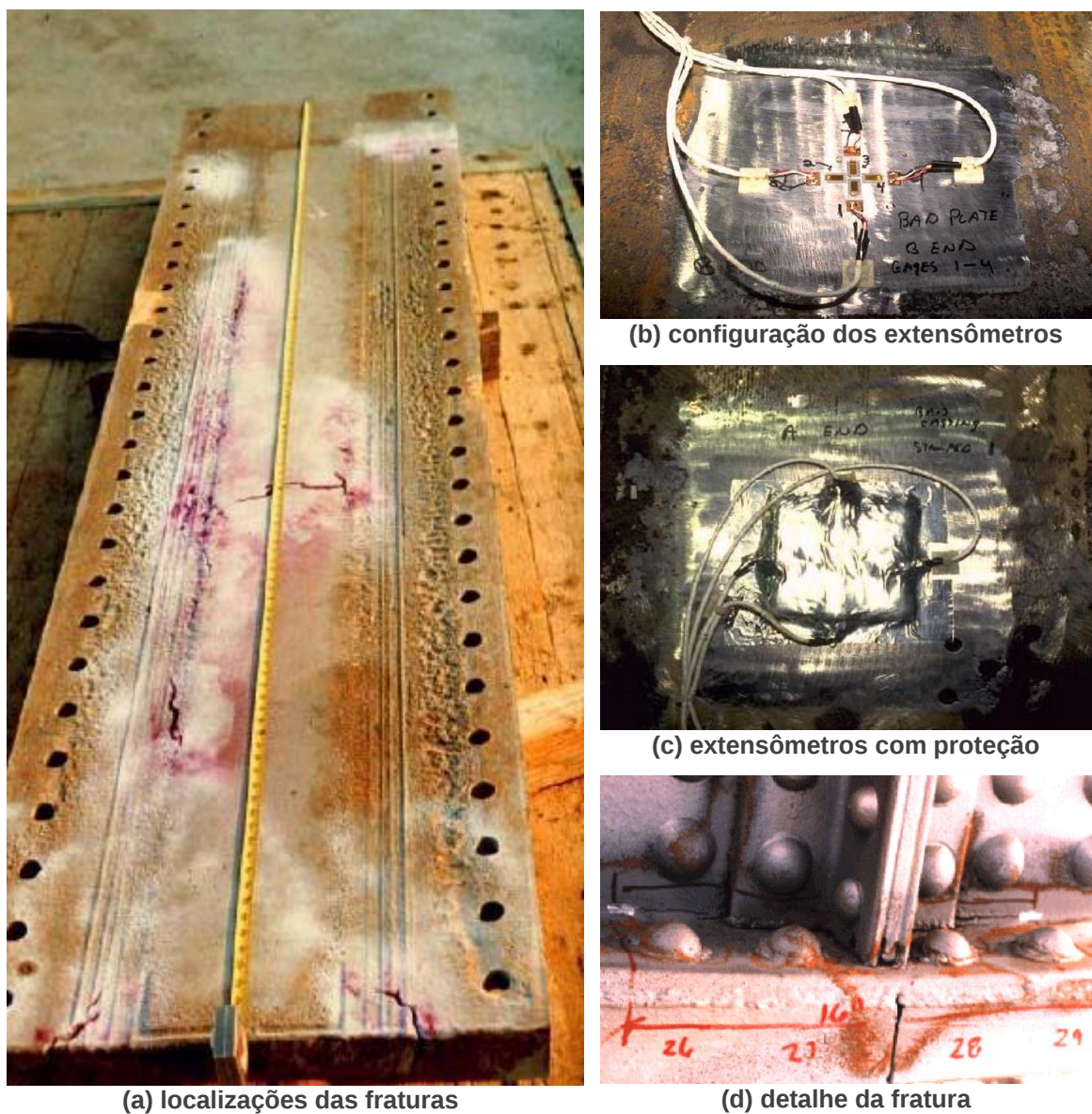


Figura 8 – Detalhes da instrumentação e fissuras ocorridas na estrutura

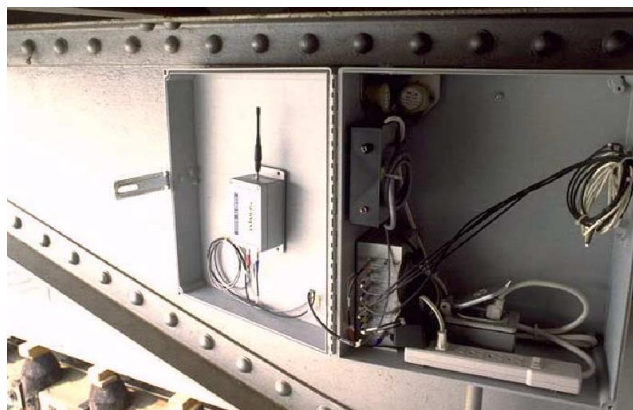


Figura 9 – Sistema para monitoramento remoto da ponte metálica

Deformações máximas da ordem de 1000 $\mu\epsilon$ foram observadas com deformação permanente após este pico de 200 $\mu\epsilon$ indicando uma possibilidade de dano nesta região e distorção permanente da peça analisada.

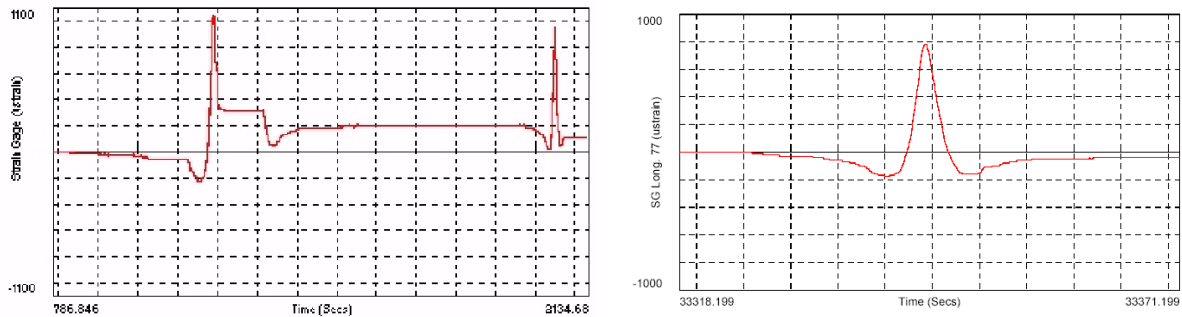


Figura 10 – Gráficos com deformações ao longo do tempo – antes e depois da recuperação da estrutura

Avaliação do momento fletor aplicado em ensaios de ligações viga-coluna em estruturas de aço e da distribuição de tensões ao longo da alma da viga

A avaliação do momento fletor aplicado em uma ligação viga-coluna cujo protótipo é constituído de uma coluna bi-rotulada e uma viga em balanço pode ser efetuada através da instalação de quatro extensômetros elétricos lineares em cada uma das mesas da viga. Com isto, obtém-se a força de tração e compressão transmitidas através destas mesas e, conseqüentemente, o momento fletor obtido através deste binário de forças multiplicadas pela distância que as separam. Este esquema pode ser visualizado na figura 4.

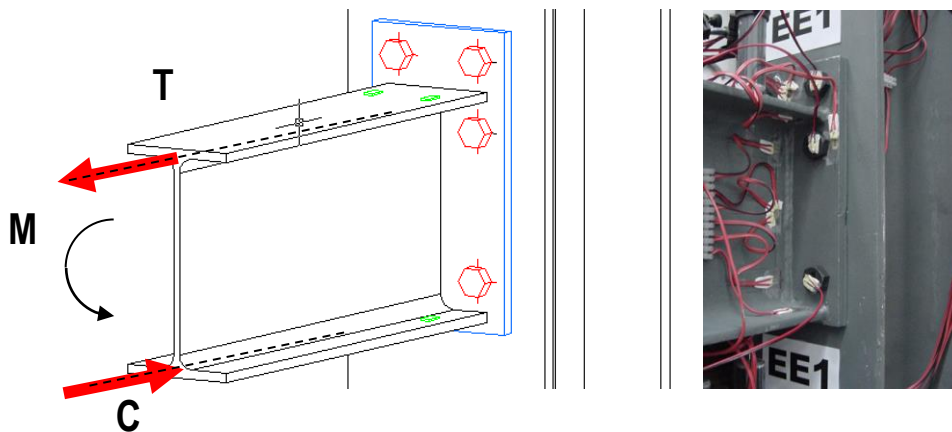


Figura 11 – Avaliação do momento fletor aplicado em ligações viga-coluna

Ainda através dos extensômetros elétricos lineares colocados nas mesas da viga conforme comentado anteriormente, pode-se obter a distribuição de tensões ao longo da alma da viga com a utilização de pelo menos mais três extensômetros instalados nesta alma. Entretanto, o extensômetro colocado sobre a linha média da viga pode ser substituído por

uma roseta tripla (0° , 45° e 90° , respectivamente) de forma a fornecer também as deformações e tensões principais além da direção principal naquele ponto.

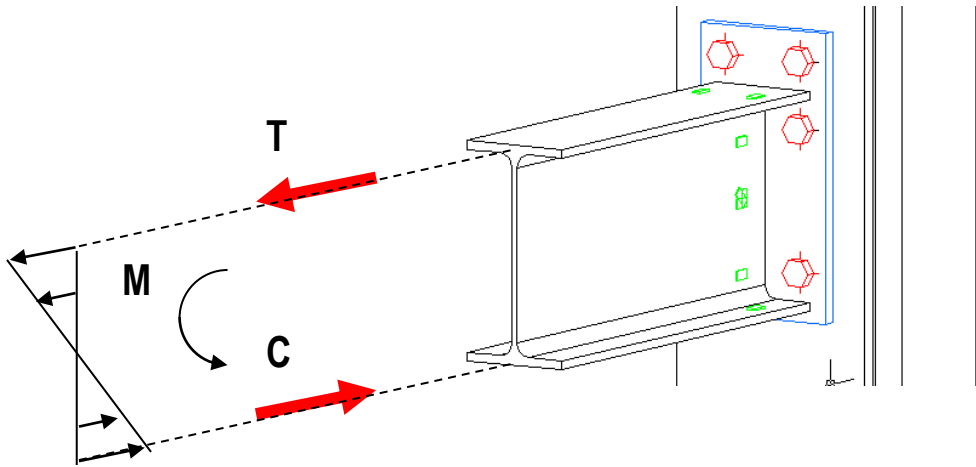


Figura 12 – Avaliação da distribuição de tensões em ligações viga-coluna

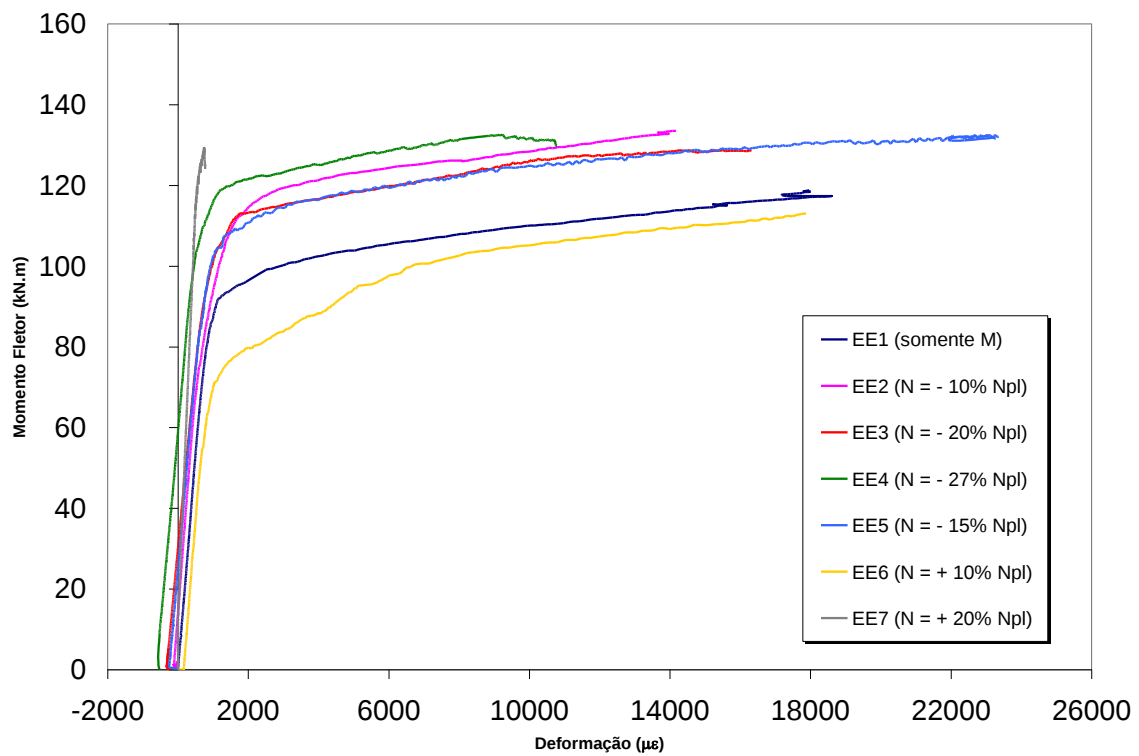


Figura 13 – Média das deformações medidas na mesa superior da viga

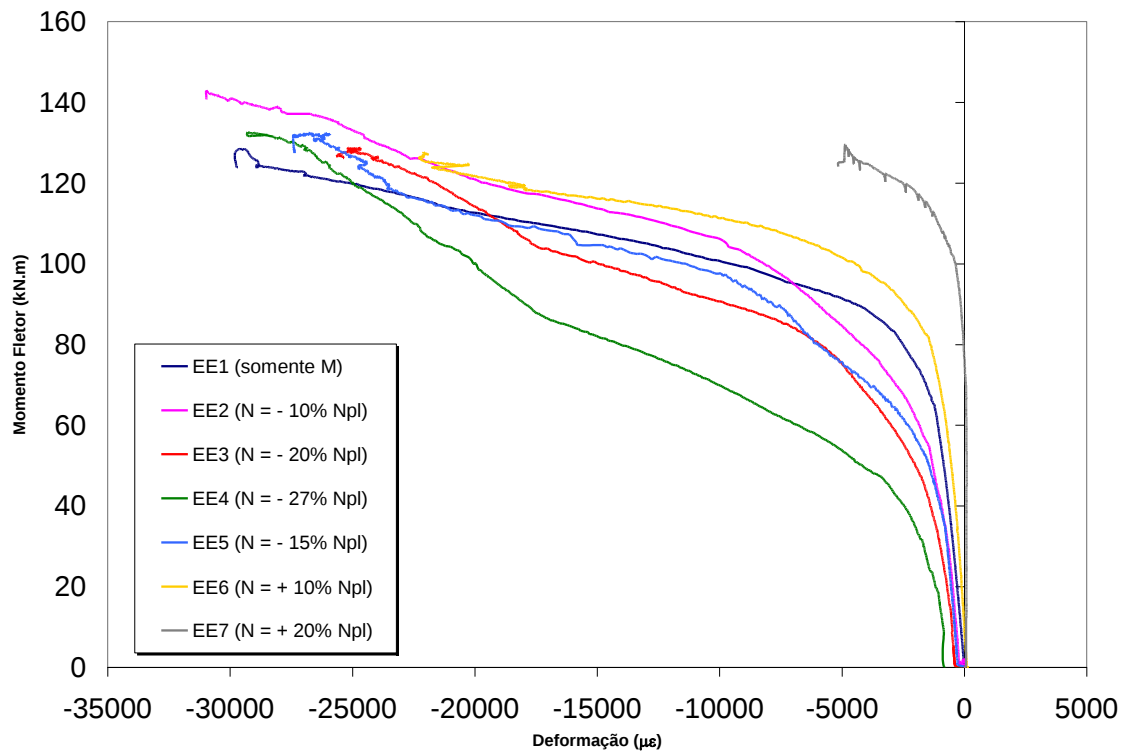


Figura 14 – Média das deformações medidas na mesa inferior da viga

Medição de força aplicada aos parafusos durante um ensaio e conferência do esforço de protensão aplicado no momento do aperto dos mesmos em ensaios de ligações em estruturas de aço

Um outro método para avaliação do momento fletor aplicado à ligação consiste da 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 da realização das seguintes etapas:

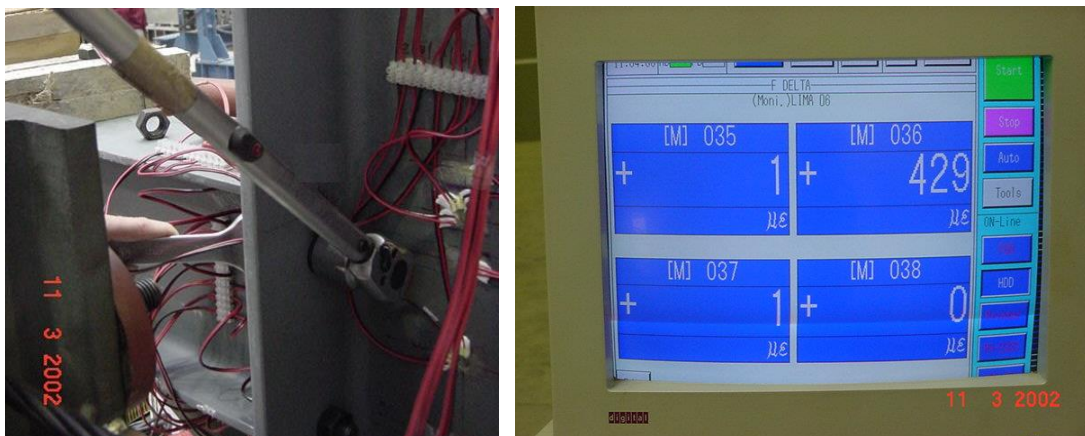


Figura 15 – Aplicação da protensão nos parafusos

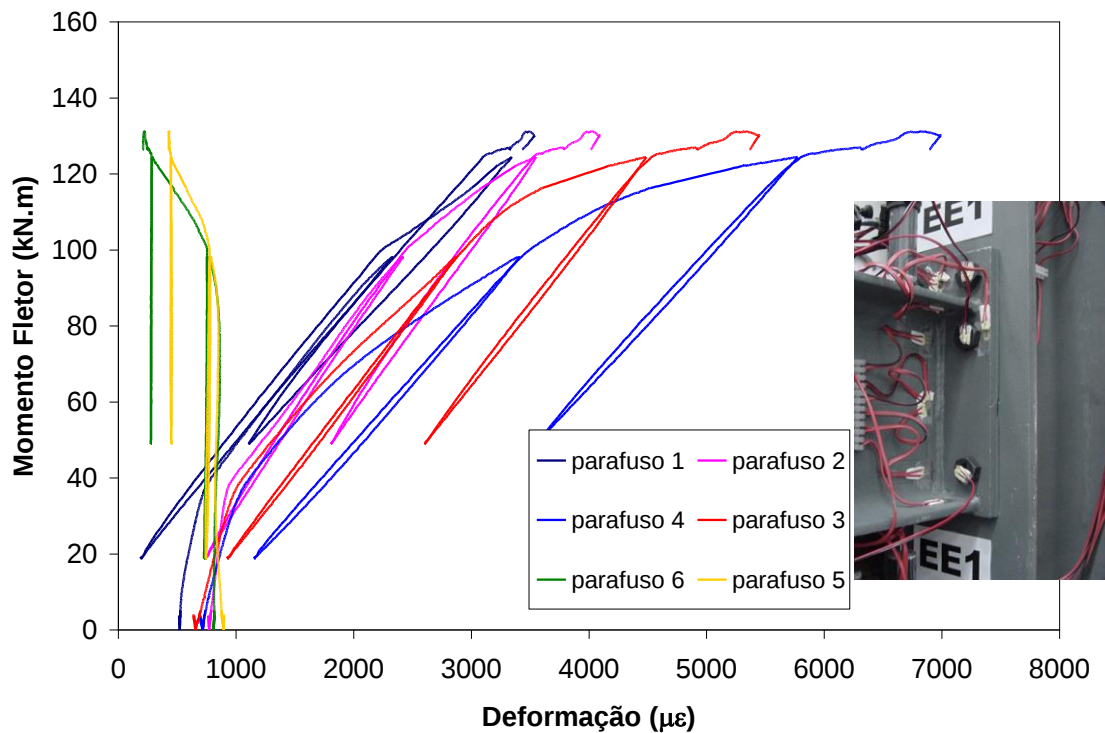


Figura 16 – Deformações medidas nos parafusos

Avaliação da distribuição de tensões ao longo da alma da coluna em ensaios de ligações viga-coluna em estruturas de aço

Uma outra utilização dos extensômetros elétricos lineares e rosetas triplas pode ser observada no esquema apresentado na figura a seguir. A configuração apresentada visa obter a influência de cada uma das componentes avaliadas na alma da coluna no comportamento global da ligação. Nos pontos onde foram instaladas rosetas triplas, deseja-se obter as deformações e tensões principais bem como as direções principais neste ponto.

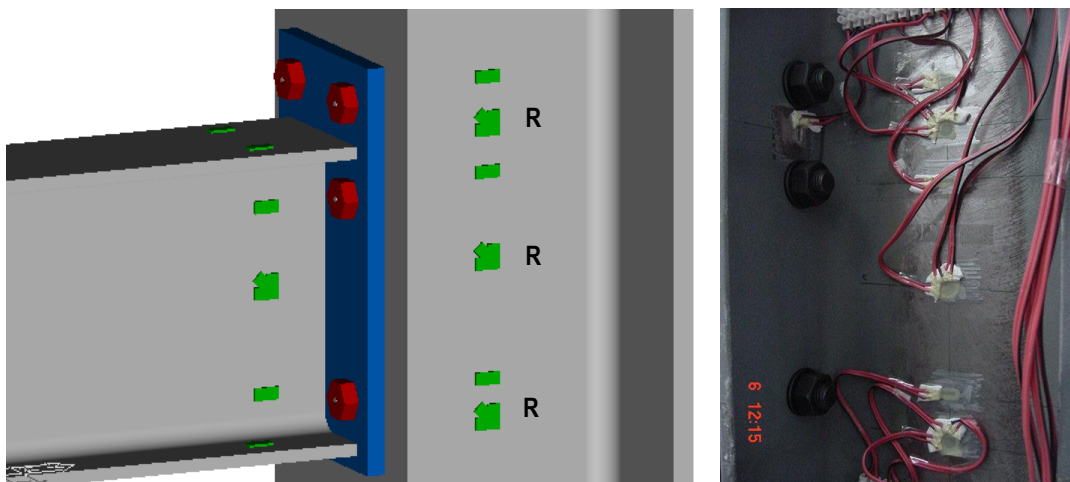


Figura 17 – Posicionamento de extensômetros e rosetas na alma da viga da coluna

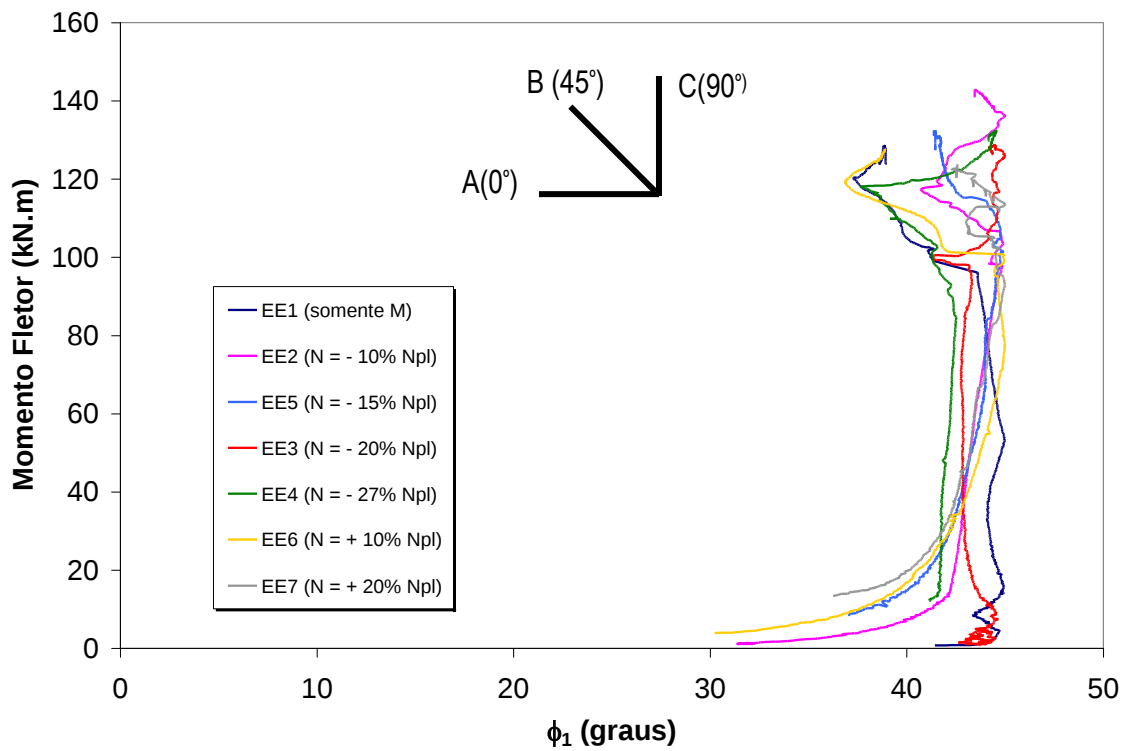


Figura 18 – Direção principal 1 – roseta no centro do painel de alma submetido a cisalhamento

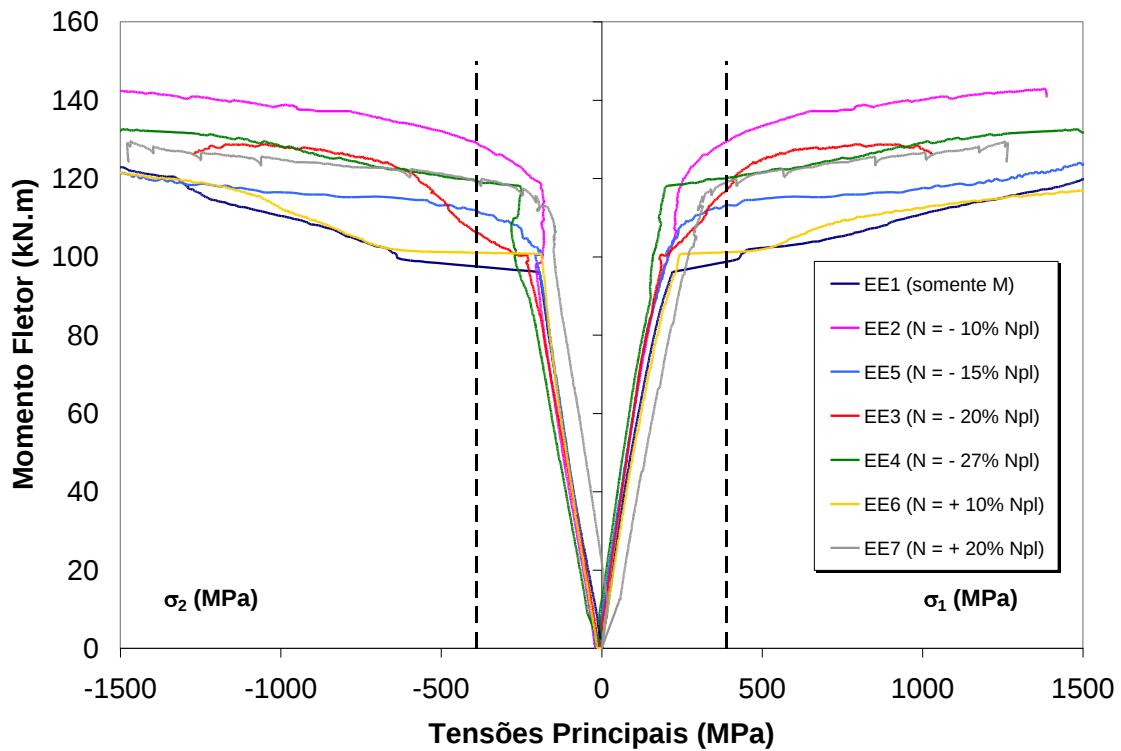


Figura 19 – Tensões principais – roseta no centro do painel de alma submetido a cisalhamento

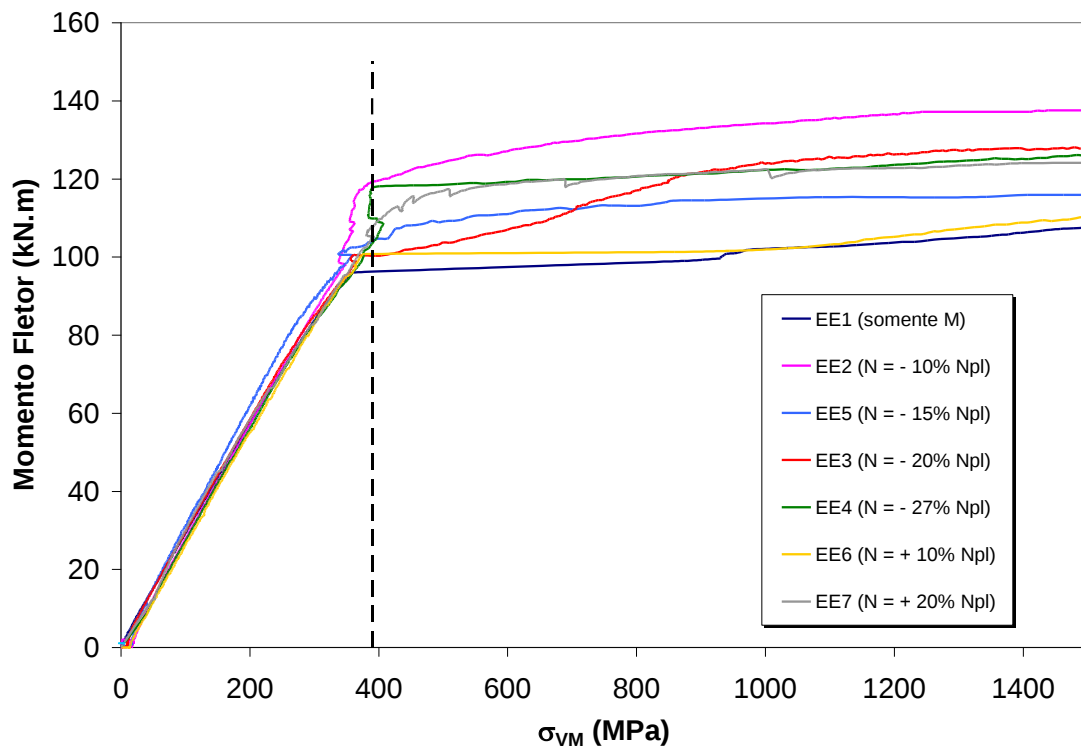


Figura 20 – Tensões Von Mises – roseta no centro do painel de alma submetido a cisalhamento

Equações Necessárias

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2}$$

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_A; \quad \varepsilon_B = \frac{1}{2}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \gamma_{xy}) \text{ e } \varepsilon_{yy} = \varepsilon_C \text{ onde } \gamma_{xy} = (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C)$$

$$\operatorname{tg} 2\phi = \frac{2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C}{\varepsilon_A - \varepsilon_C}$$

$$\sigma_1 = E \left[\frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2(1-\nu)} + \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_A + \varepsilon_C)^2 (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C)^2} \right]$$

$$\sigma_2 = E \left[\frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2(1-\nu)} - \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_A + \varepsilon_C)^2 (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C)^2} \right]$$

Links de páginas na internet com artigos que abordam a utilização de extensômetros no monitoramento de estruturas existentes:

1. Wireless Structural Monitoring of a Newly Replaced Fiber Reinforced Plastics (FRP) Bridge Deck (<http://best.umd.edu/projects/frp.html>)
2. In Service Structural Behavior of Buildings: Monitoring of the Merchant Venturers Building (<http://www.cen.bris.ac.uk/civil/research/concrete/remvb.htm>)

Links de páginas na internet de fabricantes de extensômetros:

3. TML (<http://www.tokyoosokki.co.jp/e/index.html>)
4. Texas (<http://www.straingage.com/>)
5. KYOWA (http://www.kyowa-ei.co.jp/english/index_e.htm)
6. MM – VISHAY

(http://www.vishay.com/brands/measurements_group/strain_gages/mm.htm)

Página na internet com estas notas de aula
<http://openlink.br.inter.net/lucianolima/strain.pdf>