



MONITORAÇÃO ESTRUTURAL E INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL APLICADOS AO ENSINO EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA CIVIL

Wilson J. Soares da Silva - willjrsoares@hotmail.com
Universidade Federal de Alagoas
Tabuleiro do Martins
57072-970 - Maceió – Alagoas

Prof. Dr. Wayne Santos de Assis - wayne@lccv.ufal.br
Universidade Federal de Alagoas – Centro de Tecnologia
Laboratório de Estruturas e Materiais
57072-970 - Maceió - Alagoas

Resumo: A proposta deste projeto consiste no desenvolvimento de uma ferramenta de apoio ao ensino presencial, para uso em disciplinas de graduação e pós-graduação em Engenharia Civil, baseada na utilização de monitoração estrutural e de instrumentação virtual. Uma barra metálica foi instrumentada através de sensores para a monitoração de deformações, sendo que o acompanhamento da variação dessa grandeza foi realizado por meio de um hardware de aquisição de dados controlado por software, que por sua vez foi desenvolvido utilizando LabVIEW, uma plataforma computacional voltada à instrumentação virtual. Os dados provenientes do sistema de monitoração instalado no protótipo são apresentados em tempo real, assim como os resultados das operações matemáticas realizadas sobre os dados coletados. O conjunto dessas informações permitirá aos alunos visualizar as relações entre deformações e deslocamentos e entre deformações e tensões, auxiliando-os a perceber como os recursos de extensometria podem ser bastante úteis para a caracterização estrutural.

Palavras-chave: Instrumentação, Monitoração, Tratamento e Interpretação de dados.

1. INTRODUÇÃO

A proposta deste projeto consiste no desenvolvimento uma ferramenta de apoio ao ensino presencial para disciplinas de graduação e pós-graduação em Engenharia Civil, baseada em monitoração estrutural e instrumentação virtual. Para tanto, foi utilizado um modelo reduzido constituído por uma barra metálica instrumentada, representando uma viga em balanço. A barra metálica pode ser monitorada através de uma rede de sensores elétricos dispostos em sua superfície (faces superior e inferior), a qual é dedicada à medição das deformações na flexão. Uma placa desenvolvida no laboratório foi utilizada para a realização da aquisição dos dados, condicionamento e conversão A/D dos sinais elétricos, enquanto o tratamento dos sinais digitalizados e o controle do hardware de aquisição de dados são feitos por meio de um programa construído utilizando LabVIEW, uma plataforma computacional voltada à

Realização:



Organização:





instrumentação virtual. O tratamento matemático sobre os dados é realizado imediatamente após a aquisição dos mesmos, e tem como produto a representação gráfica e dinâmica da linha elástica da viga, o que possibilita aos alunos uma reflexão sobre as relações entre deformações, tensões e deslocamentos, facilitando a fixação de conceitos referentes à mecânica dos materiais, análise experimental de estruturas e suas aplicações.

2. METODOLOGIA

Fez-se necessário estudar e compreender a bibliografia sobre os mecanismos de funcionamento dos sensores utilizados para a captura das deformações e na sua integração ao corpo de prova estudado, passando pelo sistema de aquisição de dados, comunicação com o computador e o desenvolvimento de um programa pelo software LabVIEW para controle do sistema de aquisição, bem como a visualização e tratamento dos dados obtidos para a geração da linha elástica.

Para a construção do protótipo, foi necessário projetar a viga em balanço, bem como definir o plano de monitoração da mesma. O plano de monitoração envolveu a determinação quantitativa e qualitativa dos sensores utilizados, considerando também o posicionamento dos mesmos.

Foi feito também o acompanhamento da construção do sistema de aquisição de dados, hardware criado pelo técnico de laboratório do CTEC, e o desenvolvimento do programa de aquisição, visualização e tratamento de dados, e por último a montagem do sistema de monitoração.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Extensometria

Para a medição de variações relativas de comprimento (deformações) em peças estruturais, atualmente são utilizados sensores que medem deformações de forma eficaz, como os sensores elétricos, sensores de corda vibrante ou sensores a fibra óptica (ASSIS, 2010). A escolha adequada dos sensores a empregar depende de vários fatores, tais como o porte e características do sistema estrutural; quantidade e localização dos pontos a serem monitorados e tipo do ensaio a ser realizado, dentre outros. No contexto desse trabalho, a aplicação de sensores à fibra óptica se mostrou proibitiva, em virtude dos elevados custos envolvidos, enquanto os sensores de corda vibrante não constituíram opção viável pelas dimensões incompatíveis com as reduzidas dimensões da estrutura montada para o experimento, além do custo relativamente alto. Assim, foram utilizados extensômetros de resistência elétrica, em virtude do seu baixo custo, facilidade de aplicação, disponibilidade do sistema de aquisição de dados para esse tipo de sensor e adequação aos propósitos da pesquisa.

Explorando o fato que os metais mudam sua resistência elétrica quando sofrem deformações, os extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*) associam as variações dimensionais em uma grade de referência a variações na resistência elétrica da mesma, e sendo colados à superfície de um material, experimentam deformações equivalentes àsquelas sofridas pelo material, relacionando a deformação a um sinal elétrico (analógico) que posteriormente será devidamente condicionado em sistema de aquisição de dados, sendo convertido em um sinal digital e disponibilizado para leitura e tratamento em um computador (ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2004).

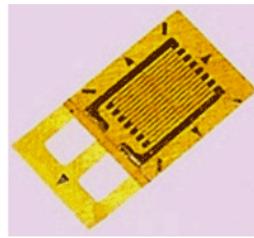


Figura 1: Modelo de extensômetro de resistência elétrica disponível no mercado.

Circuito de Medição

Circuitos elétricos especiais são empregados para avaliar as medidas de deformação com extensômetros montados em corpos de prova, e realizam esta tarefa medindo pequenas variações de resistência dentro do circuito elétrico.

Para esse propósito, o circuito utilizado com maior frequência é a ponte de Wheatstone. Na montagem da ponte de Wheatstone com um extensômetro, denominada ligação em um quarto de ponto e esquematizada na figura 2, o extensômetro corresponde a uma resistência variável e corresponde a um dos braços da ponte, enquanto os outros três braços são compostos por resistores de precisão fixos. Sendo fornecida uma tensão de entrada E , é observada uma tensão de saída e , e através da aplicação de conceitos básicos de eletricidade, obtém-se a equação 1.

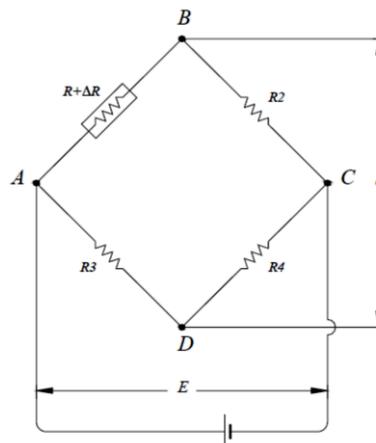


Figura 2: Circuito de Medição. Fonte: ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2004.

$$\varepsilon = \frac{4e}{KE} \quad (1)$$

Na equação 1, ε é a deformação medida, enquanto K é uma constante chamada sensibilidade à deformação do material resistivo que constitui o extensômetro.

Para a medição de deformações associadas à flexão, é possível utilizar uma montagem posicionando dois extensômetros nos braços adjacentes da ponte de Wheatstone conforme a figura 3. Esse tipo de ligação, denominada de meia ponte, permite a compensação de deformações de origem térmica e geralmente está associada à aplicação dos extensômetros nas faces superior e inferior do espécime.

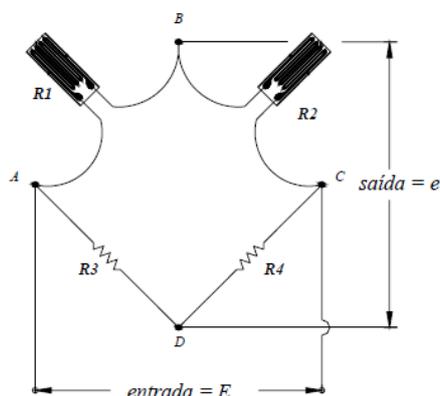


Figura 3: Ligação em meia ponte. Fonte: ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2004.

Como o protótipo foi montado em laboratório, em ambiente climatizado, não se fez necessário compensar a deformação devido à temperatura, sendo utilizada a montagem em um quarto de ponte. Sobre a ponte de Wheatstone, o valor da resistência inicial de um extensômetro e dos resistores de precisão utilizados para completar o circuito é 120Ω ou 350Ω . O valor de K é fornecido pelo fabricante para cada lote de extensômetros, entretanto, o valor típico dessa constante, para extensômetros de uso geral com grade constituída por constantan, encontra-se entre 2,00 e 2,15.

3.2. Aquisição dos Dados

O sistema de aquisição de dados foi construído pelo Técnico de Laboratório José Henrick Ramalho. O referido técnico montou um dispositivo que captura os sinais analógicos provenientes dos extensômetros e os converte em sinais digitais. A comunicação com o computador é realizada por meio de cabo serial (protocolo RS 232), permitindo que as informações sejam disponibilizadas para tratamento e análise. O sistema construído contém os seguintes componentes: Ponte de Wheatstone, amplificador de sinal, conversor A/D e módulo de comunicação serial. Sucintamente, as etapas envolvidas na aquisição e condicionamento do sinal, desde a entrada até a saída, são as seguintes: o sinal analógico é obtido através do circuito elétrico montado na placa, que associa um valor de tensão correspondente à deformação sofrida pelo extensômetros. Em seguida, este sinal analógico é amplificado em torno de quinhentas vezes, sendo encaminhado ao conversor A/D, onde é transformado em um sinal digital, que por sua vez é transmitido ao computador através da comunicação serial. O sinal digital é armazenado em um arquivo e fica disponível para tratamentos e análises em tempo real ou para consultas e operações posteriores. O sistema de aquisição construído e utilizado pode ser observado na figura 4.

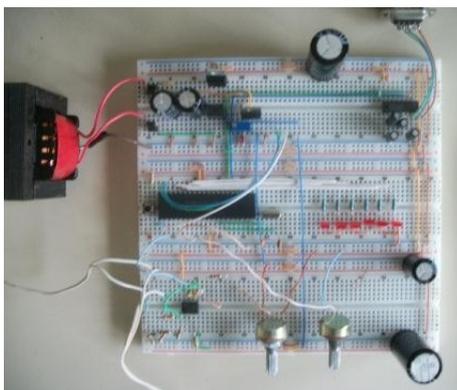


Figura 4: Placa de Aquisição montada pelo técnico.

3.3. Integração dos Extensômetros ao Corpo de Prova

Esta etapa é de grande importância para o experimento e desenvolvimento da pesquisa, pois a aplicação dos extensômetros no corpo do material estudado deve ser feita de forma cuidadosa, a fim de que as impurezas ou sujeiras na superfície, bem como o posicionamento dos sensores sobre a peça, não interfiram significativamente nas informações de interesse. Antes da aplicação dos extensômetros é necessário que já tenha sido feito um planejamento sobre quais serão os pontos de medição e a orientação em cada ponto. Em seguida, é necessário deixar a superfície em adequadas condições de se aplicação dos sensores, tendo em vista garantir boa aderência entre a superfície da peça e os extensômetros. Também é necessário marcar a posição na qual os extensômetros serão colados, sendo que essa marcação pode ser feita alinhando-se o eixo do extensômetro com um dos eixos da peça a 0° , 45° ou 60° , ou segundo outro ângulo previamente definido, de acordo com a medição que se pretende realizar e do tipo de extensômetro, sendo a primeira dependência a mais importante (GRANTE, 2004). Neste projeto, os eixos dos extensômetros foram posicionados a 0° com os eixos da peça.

Após a marcação, é feita a aplicação do adesivo nos pontos do corpo de prova nos quais os sensores serão instalados. Uma vez posicionados os sensores, é aplicada certa pressão sobre o conjunto até que ocorra a fixação de cada sensor à peça. A cura do adesivo assume importância devido à sua influência no desempenho do extensômetro, sendo relevante atentar às orientações e recomendações do fabricante quanto à pressão e temperatura nas quais o extensômetro deve ficar sujeito durante o processo de colagem.

Quando um extensômetro é colado e a cura está completa, este está pronto para operação. A peça utilizada para os propósitos da pesquisa, uma barra metálica utilizada como uma viga em balanço, é ilustrada na figura 5 e apresenta os extensômetros já colados em sua superfície. É importante informar que a peça já havia sido devidamente instrumentada antes do início dessa pesquisa, e se encontrava nas dependências do Laboratório de Estruturas e Materiais.

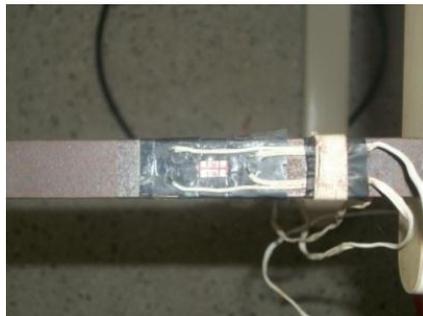


Figura 5: Peça instrumentada com extensômetros.

3.4. Aquisição e Tratamento dos Dados

O objetivo associado a essas atividades é determinar, através da deformação medida em um ponto da barra instrumentada, a linha elástica da mesma na sua configuração deformada, proveniente de um carregamento concentrado aplicado na extremidade livre da barra, onde a outra extremidade se encontra engastada e nas proximidades de seu engastamento estão colocados os sensores elétricos que capturam as informações de deformação da barra neste ponto monitorado, podendo assim a partir dessas informações estabelecer as relações entre a deformação medida e a flecha formada pelo deslocamento vertical da barra no ponto de aplicação da carga, bem como em alguns pontos determinados da peça, gerando assim através de uma interpolação polinomial dos valores obtidos uma curva representativa da linha elástica da peça fletida.

Aquisição dos Dados

Para aquisição dos dados oriundos da placa de aquisição, foi usada uma função de driver de instrumento do LabVIEW que se comunica com o software do driver chamado VISA (Virtual Instrument Software Architecture).

No LabVIEW, VISA é uma biblioteca única de funções que se utiliza para se comunicar com instrumentos VXI, GPIB, serial ou baseados em computador. Não se faz necessário utilizar paletas de I/O distintas para programar um instrumento (NATIONAL INSTRUMENTS, 2003).

A figura 6 mostra a rotina criada para aquisição dos dados de provenientes da placa de aquisição.

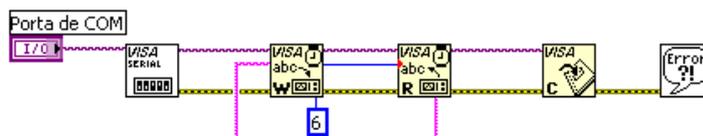


Figura 6: Rotina criada para aquisição das informações monitoradas.



Tratamento dos Dados

Os dados obtidos são tratados para serem transformados de tensão elétrica para deformação mecânica de acordo com a equação 1, e para que esses valores de deformação sejam transformados em deslocamento vertical em pontos determinados ao longo do vão da peça até no ponto de aplicação da carga, é utilizada a equação 2.

$$W = \frac{E \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot L} \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Onde W é a carga aplicada, E é o módulo de elasticidade do material, b é a largura da peça, h a sua altura, L é a distância entre o ponto de aplicação da carga e o sensor e ε é a deformação medida pelos extensômetros.

A figura 7 mostra o modelo representativo usado para obtenção das equações:

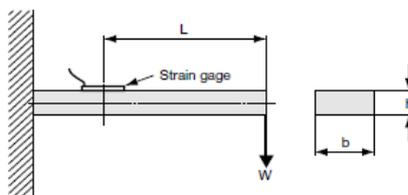


Figura 7: Modelo representativo da situação real.

Fazendo o estudo da equação da linha elástica para o caso estudado, encontra-se a equação 3:

$$\delta = \frac{W}{12EI} (6lx^2 - 2x^3) \quad (3)$$

Onde l é comprimento efetivo entre a extremidade em balanço da peça e o seu ponto de engastamento, I é o momento de inércia da peça e x representa os pontos na peça em que são medidas as deformações.

A partir das equações 2 e 3 obtemos a equação 4:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{6Lh} (6lx^2 - 2x^2) \quad (4)$$

Onde δ representa o deslocamento vertical sofrido pela peça.

A equação 4 nos dá informações sobre o deslocamento da peça em determinados pontos e com estes se pode fazer uma interpolação polinomial, obtendo uma curva que representa a linha elástica da peça, lembrando que o valor da deformação varia conforme o corpo se desloca devido a aplicação de um carregamento, o processo se dará de forma interativa gerando uma curva em tempo real.



A figura 8 mostra o experimento montado. As dimensões requeridas pela equação 4 correspondem aos seguintes valores: $l = 0,462 \text{ m}$, $L = 0,375 \text{ m}$, $b = 0,019 \text{ m}$ e $h = 0,0305 \text{ m}$.



Figura 8: Viga instrumentada.

Com base nessas informações é possível gerar a curva representativa da linha elástica. Um trecho do diagrama de blocos do programa criado é apresentado pela figura 9:

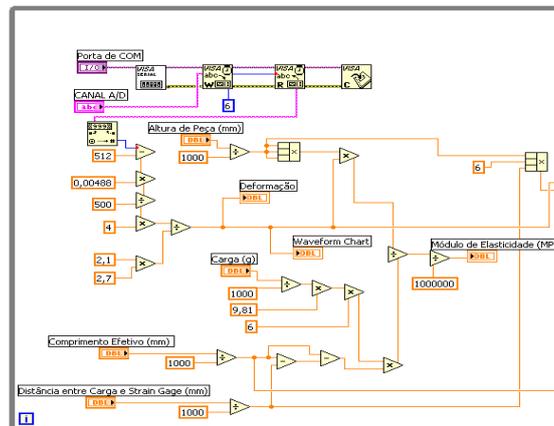


Figura 9: Parte do algoritmo criado pelo primeiro autor.

O programa em funcionamento mostra o painel frontal com o aspecto indicado na figura 10:

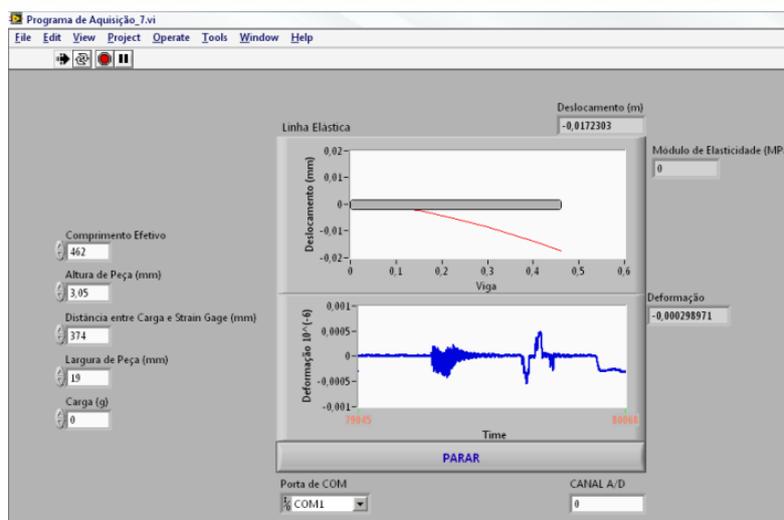


Figura 10: Painel Frontal.

Observa-se que o programa mostra a linha elástica da viga como desejado ao se aplicar à viga um carregamento em sua extremidade livre.

A título de comparação, foi usado um micrômetro para comparar o valor de deslocamento vertical na extremidade da viga com esta mesma variável obtida pelo programa criado. Foram feitas algumas medições, onde uma delas está mostrada na figura 11, comparando os valores fornecidos pelo micrômetro e pelo programa, respectivamente:

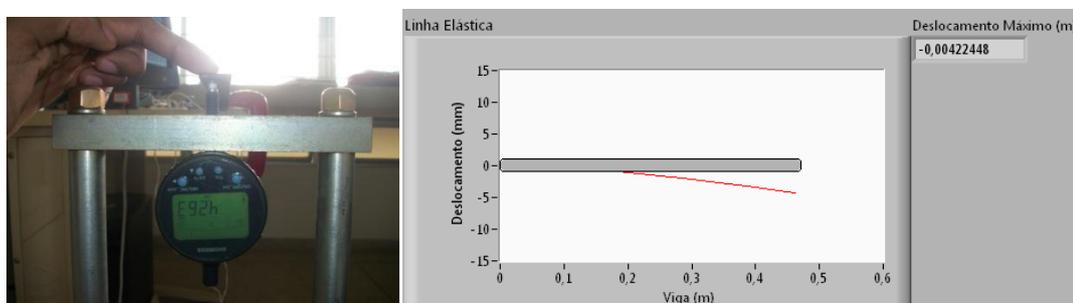


Figura 11: Micrômetro à esquerda e LabVIEW à direita.

Pode-se ver na figura 11 que o deslocamento no ponto mostrado foi de aproximadamente 0,004 m ou 4 mm, indicando boa aderência entre o resultados experimental e analítico.

Uma tabela pode ser gerada observando os valores obtidos com um micrômetro e o experimento realizado.

Tabela 1: Comparativo entre instrumento e dados experimentais

Micrômetro (mm)	Experimento (mm)
1,5	1,2
2,2	2,0
3,1	2,9
4,2	4,2



A tabela mostra valores experimentais bastante satisfatórios, em comparação com aqueles fornecidos pelo instrumento, apontando a utilidade e credibilidade dos recursos de extensometria e um bom processo de aquisição de dados, quando conduzidos de maneira correta em relação aos seus mecanismos de funcionamento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do que foi proposto pelo projeto, os autores do mesmo conseguiram de forma simples e objetiva mostrar que a utilização eficiente de um bom sistema de monitoração de estruturas acompanhado por um seguro sistema de aquisição de dados é uma boa ferramenta de aprendizado para um aluno de engenharia, bem como abre um “leque” para um crescente ramo na área de estruturas civis, despertando no mesmo o interesse de aprofundar-se na questão da monitoração de estruturas.

Quanto à revisão de literatura feita pelo primeiro autor, esta mostrou-se bastante relevante e frutífera para o mesmo, ajudando-o a compreender e aplicar de forma prática as teorias envolvidas nos assuntos abordados e sua valia para sua formação acadêmica, percebendo que existem técnicas, equipamentos e dispositivos capazes de avaliar parâmetros de grandeza física na mecânica dos materiais, que relacionam os variados comportamentos reais destes com modelos teóricos simplificados aplicados à engenharia com bastante rigor, o que capacita um estudante, profissional ou pesquisador da área de estruturas e o ajuda a entender os fundamentos da mecânica das estruturas.

O resultado obtido no estudo indica que as ferramentas desenvolvidas podem contribuir para aprimorar o sentimento físico do experimentador, aluno, técnico e professor em relação à engenharia de estruturas e de materiais, bem como os conceitos comumente abordados em sala de aula, mostrando ao interessado que os limites entre as teorias simplificadoras e a realidade em questão, se confundem quando essas teorias são tratadas e aplicadas com devido rigor, representando a realidade de forma consistente.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Alagoas pela bolsa PIBIC concedida, ao técnico de laboratório José Henrick Viana Ramalho pelo apoio durante o desenvolvimento do projeto e ao Laboratório de Estruturas e Materiais pelos recursos físicos disponibilizados.

5. REFERÊNCIAS

ASSIS, W. S. Curso formação básica LabVIEW. Apostila para curso de formação básica em LabVIEW na Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2006. p. 1-222.

ASSIS, W. S. Projeto PIBIC 2010-2011. Monitoração estrutural e instrumentação virtual aplicados ao ensino experimental de engenharia civil. Universidade Federal de Alagoas - UFAL. Maceió, 2010. 15 p.

ASSIS, W. S. Sistemas Computacionais de Apoio à Monitoração de Estruturas de Engenharia Civil. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.p. 1-29.



ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. Extensometria Básica. Universidade Estadual Paulista - Júlio Mesquita Filho - Unesp. Ilha Solteira, 2004. 46 p.

GERE, J. M., São Paulo, CENGANGE Learning, 2009. p. 449-466.

GRANTE, Grupo de Análise e Projeto Mecânico. Apostila de extensometria. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2004.

HIGDON, A.; OHLSEN, E. STILES, W. B. WEESE, J. A. RILLEY, W. F. O Carregamento de Flexões: Deflexões. Mecânica dos Materiais. 3º ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois S.A. 1981. p. 256-290.

MACHADO JÚNIOR, E. F. Introdução à Isostática. 1º ed. EESC/USP. Projeto REENGE, São Paulo, 1999.

NATIONAL INSTRUMENTS, Introdução à Programação G. Disponível em: <http://digital.ni.com/worldwide/brazil.nsf/web/all/CE9ADD7916BC507E8625757D006CFB27>> Acesso em: 08 de set. 2010.

NATIONAL INSTRUMENTS, Tutorial. Disponível em: <http://www.ni.com/swf/presentation/pt/aap/>> Acesso em: 06 de set. de 2010.

NATIONAL INSTRUMENTS, User Manual. April 2003 Edition, Austin, 2003. p. 1-123

SUSSEKIND, J. C. Curso de Análise Estrutural. V. 1. Globo, Rio de Janeiro, 1984.

TIMOSHENKO, S. P. et. GERE, J. E. Deformação de Vigas. Mecânica dos Sólidos. V. 1. LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1983. p.135-174.



STRUCTURAL MONITORING AND VIRTUAL INSTRUMENT APPLIED TO TEACHING ENGINEERING CIVIL EXPERIMENTAL

***Abstract:** The purpose of this project is to develop a tool to support classroom learning, for use in undergraduate courses and graduate in Civil Engineering, based on the use of structural and monitoring of virtual instrumentation. A metal bar was instrumented with sensors for monitoring strain, and monitoring the variation of the quantity was performed by a data acquisition hardware, software controlled, which in turn was developed by the pupil (author) using LabVIEW, a computing platform focused on virtual instrumentation. The data from the monitoring system installed in the prototype are shown in real time, as well as the results of mathematical operations performed on the data collected. All such information will allow students to visualize the relationships between strain and displacement and between strain and stress, helping them to understand how the resources of gage can be quite useful for structural characterization.*

***Keywords:** Instrumentation, Monitoring, Data Analysis and Interpretation.*