

CONTROLE DO CARREGAMENTO NO ENSAIO DE ESTRUTURAS MECÂNICAS

Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Eng^o. Mec., M.Sc
Carlos Alberto Schneider, Eng^o. Mec. Dr. Ing.
Laboratório de Metrologia e Automatização do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis - Santa Catarina

Resumo

É apresentada uma metodologia automatizada para controlar e monitorar o carregamento aplicado em ensaios não destrutivos de estruturas mecânicas submetidas a carregamento externo complexo. Reúne aspectos de segurança e recursos como a obtenção e uso da matriz de influência para acelerar a convergência do carregamento múltiplo. Aspectos de uma aplicação prática são abordados.

Abstract

This paper presents an automatic methodology for controlling and monitoring the loading in Non-destructive tests of mechanical structures under complex external load. Aspects such as test safety and how to obtain and use the influence matrix to increase the convergence factor are shown. Additionally, practical considerations are made.

1. ENSAIO DE ESTRUTURAS

Para que uma estrutura possa ser considerada segura, deve ser experimentalmente testada quanto a sua resistência mecânica e rapidez. O tipo de teste aplicado depende diretamente das características funcionais da própria estrutura, tipo de carregamento ao qual será submetida e da confiabilidade requerida, entre outros fatores.

O controle eficiente sobre o carregamento aplicado à estrutura é um dos aspectos fundamentais para a segurança e rapidez de execução do ensaio. Quando é factível uma medição paralela do nível de tensões mecânicas e ou a deformação específica ou total, em certos pontos notáveis da estrutura, é possível controlar melhor o ensaio, e prever, com antecedência suficiente, a iminência de falha. Entretanto, este recurso encarece significativamente o

ensaio, e só é justificável em estruturas de grande porte, de custos elevados, ou onde grandes responsabilidades são envolvidas.

Não é raro então submeter estruturas de médio e pequeno porte a ensaios menos sofisticados, onde esta é diretamente submetida a certas configurações de carregamento que, obedecendo a normas e/ou especificações de aceitação, espelham as mais desfavoráveis condições de operação. Como critério de aceitação, nestes casos, é comum atribuir a própria integridade estrutural durante o ensaio, a deformação total máxima durante o carregamento e a deformação residual da estrutura.

Ensaio deste tipo normalmente envolvem a aplicação de forças simultâneas de intensidades prescritas e em direções determinadas, aplicadas em pontos específicos e estratégicos da

estrutura /1 a 3/. Quando estas forças são configuradas por meio de suas componentes em um sistema de eixos cartesianos, é comum resultar um número relativamente grande de forças a controlar. Como consequência, tais ensaios podem resultar bastante complexos /3/.

Forças de moderada intensidade podem ser aplicadas com vantagem por meio de pesos, cabos e roldanas. Forças de médias e grandes intensidades exigem a utilização de atuadores hidráulicos ou mecânicos, tais como macacos, tracionadores, etc (aqui genericamente chamados de atuadores). Sua atuação pode ser direta, ou por meio de cabos e roldanas. Este sistema, além de exigir um controle refinado da aplicação da carga, exige a presença de um dinamômetro associado a cada atuador para monitoração do carregamento.

Atuadores servo controlados sofisticados são capazes de manter estável um valor determinado de força, dispensando o uso de dinamômetros. Porém seu custo os torna proibitivos para boa parte das aplicações.

De forma análoga a uma mola mecânica fixa em uma extremidade, cuja força é gerada pelo deslocamento de sua extremidade livre em relação a sua posição de equilíbrio, surgem as forças nas estruturas quando são impostos deslocamentos por meio dos atuadores.

A ação de um atuador comum é sempre de deslocar o ponto de atuação, e, independentemente da força que daí possa resultar, manter estável o deslocamento já aplicado. A ação de um segundo atuador alterará as relações força-deslocamento na estrutura já deformada, modificando suas reações, fazendo com que a força do primeiro atuador, cujo deslocamento permaneceu praticamente estável, seja alterada. Neste sistema existe sempre retroação de uma nova força imposta por um atuador sobre as demais.

Na prática, atingir uma determinada configuração de carga em

uma estrutura, por meio de atuadores, é uma tarefa complexa, principalmente quando um número grande de forças é envolvido. Pode ser extremamente onerosa, e até mesmo impossível, se o método da tentativa for empregado sem nenhum outro recurso suplementar.

2. A MATRIZ DE INFLUÊNCIA

Seja uma estrutura onde m cargas devam ser aplicadas por meio de atuadores, que apenas deslocam a posição do ponto de aplicação de carga. Suponha que exista um pré-carregamento em todos os atuadores. A seguir, aplica-se um incremento de carga unitária no i -ésimo atuador. Este incremento irá perturbar, mais ou menos, cada uma das demais cargas pré-aplicadas. O acréscimo de carga em cada um dos demais pontos de aplicação recebe o nome de coeficiente de influência da carga i . Assim, existem m coeficientes de influência para cada carga incrementada. Repetindo este processo, chega-se a conclusão que existem $m \times m$ coeficientes de influência, que podem ser agrupados em uma matriz: a matriz de influência da estrutura. Se as forças e os deslocamentos envolvidos não são muito elevados, a linearidade é preservada e a matriz de influência é simétrica.

Define-se a quantidade Δ_{ij} como o acréscimo de carga no i -ésimo ponto provocado por um incremento unitário na j -ésima carga.

Em um ensaio, o valor final desejado da carga para cada ponto é conhecido e deve ser atingido simultaneamente em todos os pontos de aplicação de carga. O ponto de partida geralmente é a configuração atual de carga. Resta determinar quanto se deve incrementar cada carga atual para que no conjunto todos os valores finais sejam atingidos simultaneamente.

Seja FF_j o valor da j -ésima força final a ser atingida, FA_j o valor atual da j -ésima força e DF_j o valor do j -ésimo incremento de força que deve ser dado cada FA_j para que resultem todos os FF_j simultaneamente. A matriz de

influência pode ser usada na determinação dos DFj da seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} DF1 \\ DF2 \\ DF3 \\ \vdots \\ DFm \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 & \dots & A1m \\ A21 & A22 & A23 & \dots & A2m \\ A31 & A32 & A33 & \dots & A3m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Am1 & Am2 & Am3 & \dots & Amm \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} FF1 - FA1 \\ FF2 - FA2 \\ FF3 - FA3 \\ \vdots \\ FFn - FAn \end{Bmatrix}$$

Estes valores de DFj são incrementos em unidades de carga que devem ser aplicados, em qualquer ordem, à estrutura que finalmente levarão esta à configuração de carregamento desejada em um único passo, se o sistema for perfeitamente linear, ou interativamente, porém com rápida convergência, quando o sistema mecânico for ligeiramente não linear.

3. CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA ENSAIOS DE ESTRUTURAS

O algoritmo básico de operação de um sistema automático para ensaio de estruturas é mostrado na figura 1. É fundamental que este sistema opere em tempo real à medida em que o ensaio transcorre. O procedimento consta das seguintes rotinas.

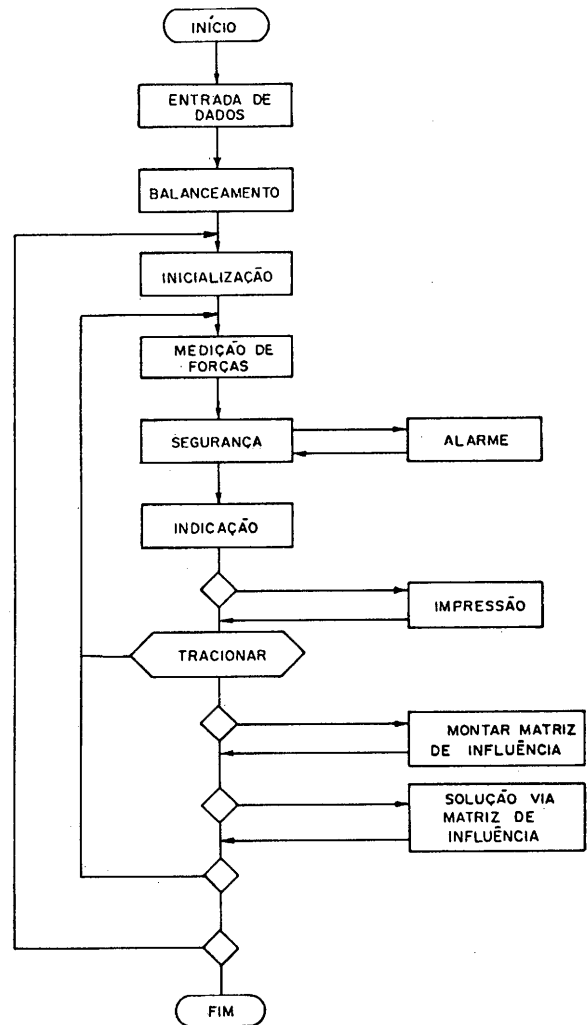
a) Entrada de Dados:

São informados ao sistema dados tais como: número de forças a aplicar/controlar, (*) forças a atingir, sobrecarga admissível para cada força e dados adicionais de endereçamento e calibração dos dinamômetros associados aos atuadores.

b) Balanceamento:

Executa a zeragem eletrônica por hardware dos dinamômetros (e atuadores). É fundamental para enquadrar os sinais dos dinamômetros dentro da faixa de medição da unidade de tratamento de sinais (UTS).

(*) (o termo força é usado aqui no sentido generalizado, podendo significar força propriamente dita, torque ou momento).



onde F_i = Força medida para o i -ésimo dinamômetro (N)
 V_i = Tensão lida (V)
 VR_i = Tensão de referência (V)
 S_i = Sensibilidade (V/N)

e) Segurança:

Testa os valores de cada força medida com os valores máximos permissíveis definidos para cada força na rotina "dados iniciais". Este valor é calculado como um valor percentual definido pelo usuário sobre a força nominal a atingir. Caso uma ou mais forças superem seu valor máximo admissível, este bloco acionará um alarme, acusando o ponto onde há sobrecarga, e permanecerá ativo até que a força referida seja reduzida. Esta rotina é de fundamental importância onde um número elevado de forças é envolvido.

f) Indicação:

Indica em mostrador apropriado (ou tela) o valor atual de cada força controlada/monitorada.

g) Documentação:

Fornece, quando solicitada, uma planilha com valores das forças atuais medidas.

h) Tracionar:

Esta rotina opera formando um ciclo fechado com as rotinas "medição de força", "segurança" e "indicação". Consiste em agir de forma controlada em cada atuador, medindo sempre a força neste resultante, até que o valor definido seja obtido. A forma de atuação depende da natureza do próprio atuador, porém recomenda-se que a medição da força seja efetuada pelo dinamômetro associado.

Em sistemas onde a aplicação das forças não seja automática, este módulo deve ser suprimido e a aplicação das forças supridas via operadores dos atuadores, com monitoração e gerenciamento por parte do sistema automático.

i) Montar Matriz de Influência:

Esta rotina atua da seguinte forma: inicialmente aplica um pré-carregamento à estrutura, atingindo entre 20 a 40% da força nominal. Uma vez que todas as forças envolvidas

tenham sido pré-tensionadas, esta rotina coordena a aplicação de um incremento de 10% da carga em cada força, porém de forma sequencial. Os valores das forças antes da aplicação de cada incremento e após são usados para determinar os coeficientes de cada coluna da matriz de influência. Geralmente este processo é efetuado apenas uma vez durante o ensaio.

j) Solução via Matriz de Influência:

Uma vez disponível a matriz de influência, os valores nominais de força a atingir, e os valores de força atuais, esta rotina usa estes dados e resolve o sistema de equações (2) que determina os incrementos de força necessários ao sistema para que, partindo da situação atual, sejam atingidos simultaneamente todos os valores nominais de força desejados.

Estes resultados devem ser usados para retroalimentar o sistema na rotina tracionar e, com isso, acelerar vertiginosamente a convergência. Para sistemas aproximadamente lineares apenas uma ou duas interações são necessárias.

4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Esta metodologia foi aplicada em campo no ensaio de postes tubulares fabricados por uma pequena indústria de Itajaí, SC, utilizados no sistema de transmissão de linhas urbanas de 69 KV da COELBA /3/.

4.1 Instrumentação utilizada

O sistema de medição de forças empregado é mostrado esquematicamente na figura 2. Consiste de 12 dinamômetros extensométricos, das unidades de balanceamento e chaveamento, ponte amplificadora e um microcomputador.

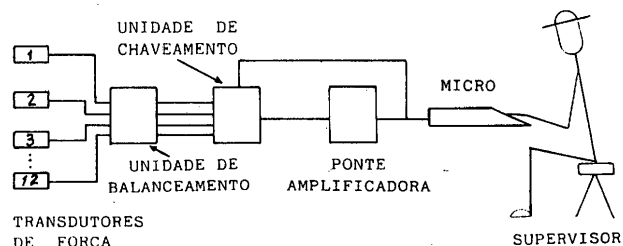


Fig. 2 - Módulos do sistema de medição de forças.

Os transdutores de força com características próprias para o tipo de trabalho foram projetados, construídos e qualificados pelo LABMETRO. Possuem um desenho robusto e compacto, adequados para as condições adversas do ensaio. Apresentam uma incerteza de medição de 1,5% dentro da faixa de 0 a 40 KN.

A unidade de balanceamento para transdutores extensométricos, também desenvolvido pelo LABMETRO, proporciona o ajuste eletrônico do sinal de cada transdutor para uma condição inicial desejada.

O computador comanda a unidade de chaveamento para conectar automaticamente o sinal de um determinado transdutor na entrada da ponte amplificadora. Esta, por sua vez, transforma o sinal do transdutor em um sinal de tensão proporcional que, passando por um conversor A/D, é adquirido pelo computador.

4.2 Os trabalhos experimentais

O ensaio foi efetuado em uma pedra (figura 3). O poste foi engastado pela base na rocha e roldanas foram fixadas nas paredes laterais e no chão para conduzir os cabos de aço usados para aplicação das componentes de cada força. Massas foram aplicadas para se obter forças de até 1200 N.

Os dinamômetros foram instalados em série com os atuadores da forma mostrada na figura 4. Assim, a força transmitida pelo dinamômetro, a menos de uma parcela devida ao atrito entre o atuador e o solo, corresponde à força atuante no cabo.

Foram usados tracionadores mecânicos manuais (figura 3) acionados por operadores, por não se dispor de atuadores automáticos que pudessem ser controlados diretamente pelo computador. A comunicação entre o computador e os operadores foi cumprida pelo supervisor do ensaio.

Foram ensaiadas no total 13 hipóteses de carregamento atribuídas a 4 tipos diferentes de postes. As forças variaram entre 6000 e 25000 N.

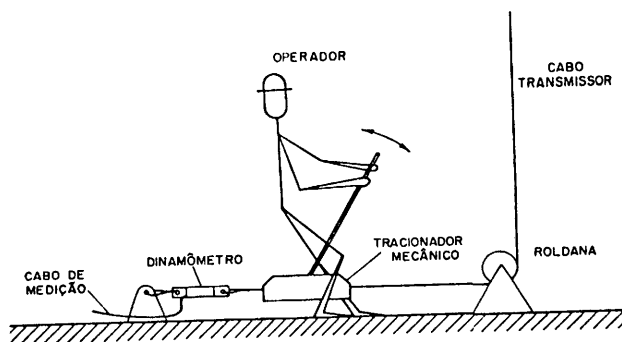


Fig. 3 - Sistema de aplicação manual e medição de força

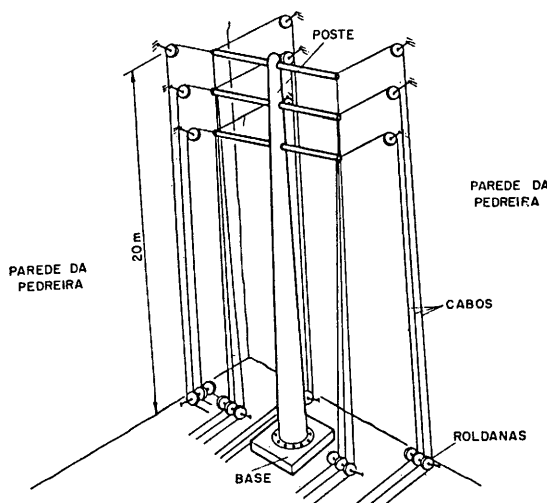


Fig. 4 - Decomposição de forças em componentes cartesianas por meio de roldanas

A matriz de influência foi levantada após uma pré-carga de aproximadamente 30% ter sido aplicada à estrutura. Foram então aplicados sequencialmente incrementos de força em cada tracionador e medidos seus efeitos sobre os dinamômetros. Uma vez disponível a matriz de influência, esta foi usada para determinar os incrementos de carga necessários para, a partir da situação atual, atingir o carregamento final desejado com rapidez.

5. CONCLUSÕES

Alguns fatores foram os principais responsáveis pelo fato da convergência, na prática, não ter se dado em um único passo: a) a dificuldade em se exercer um controle suficientemente fino nos tracionadores mecânicos manuais e b) a não linearidade do conjunto estrutural (variação dos coeficientes de influência com o nível de carregamento).

O item "a" efetivamente foi considerado como o fator mais crítico nos ensaios realizados. Para minimizar seu efeito, atuadores mais adequados seriam necessários, como por exemplo, hidráulicos, e pessoal melhor capacitado para operar os atuadores. O item "b", embora de menor importância, pode ser minimizado efetuando-se nova determinação da matriz de influência em níveis mais elevados de carregamento (por exemplo 80%).

Os recursos do alarme e do método da matriz de influência mostraram-se particularmente úteis no ensaio de estruturas. O alarme é muito importante no caso em que um pico de carga ocorrer em qualquer outro ponto distinto do ponto atuado. Os resultados do método da matriz de influência forneceram diretrizes básicas que aceleraram a convergência em todos os casos testados.

Esta metodologia pode ser naturalmente estendida para ensaiar qualquer tipo de estrutura submetida a diversos tipos de carregamento simultaneamente tais como: força, torção, pressão, etc. Como resultado, a matriz de influência conterá os coeficientes que relacionam estas grandezas. No caso em que uma destas for independente das demais ocorrerá que todos os elementos da linha e da coluna correspondente serão nulos, exceto o da diagonal principal que será unitário. No caso em que existam blocos de grandezas interdependentes entre si e independentes das demais, surgirão submatrizes nulas dentro da matriz de influência que naturalmente isolam estes blocos do resto do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ COELBA Sistema de Transmissão. Linhas Urbanas de 69 kV - Especificação Técnica de Estruturas Tubulares de Aço Galvanizado.
- /2/ LABMETRO Ensaio Mecânico do Protótipo de Estrutura

de Emergência 230 kV - Relatório Técnico - 1984.

/3/ LABMETRO

Ensaio Mecânico nas Estruturas Tubulares TS, TA1, TA2 e TA3 - Relatório Técnico - 1986.