

APLICAÇÃO DE RETROANÁLISE PARA IDENTIFICAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE DO CONCRETO DE UMA VIGA PROTENDIDA.

Maurício José Marri Furtado, Rogério de Oliveira Rodrigues, João Antonio Pereira, Haroldo de Mayo Bernardes – Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira.

Para se conhecer o comportamento estrutural das obras em engenharia torna-se necessária a identificação de diversos parâmetros, entre os quais se destaca o módulo de elasticidade, cuja identificação é fundamental para a realização de uma análise estrutural confiável, seja estática ou dinâmica.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo a aplicação de retroanálise para identificação do parâmetro módulo de elasticidade em uma viga de concreto protendido, tipo de estrutura amplamente utilizada nas construções modernas, com resistência pré-definida. Com o passar do tempo, devido ao processo de relaxação da armadura ativa e fluência do concreto, as forças de protensão sofrem uma redução, num processo chamado perda de protensão, sendo possível correlacionar o valor numérico do módulo de elasticidade com outras características da estrutura, como as perdas de protensão e as frequências naturais.

Nos anos 1980, as aplicações da retroanálise difundem-se. Atualmente, devido ao desenvolvimento da informática, a aplicação da retroanálise estende-se a diversos campos da engenharia, incluindo procedimentos de manutenção de grandes estruturas, sejam civis ou mecânicas [Pereira, 1996], possibilitando aplicações em redes neurais através dos recursos disponibilizados pela computação avançada [Fairbairn et al., 1999].

O projeto busca entender melhor o comportamento dinâmico de uma viga pré-fabricada de concreto protendido ao longo do tempo. Para tanto, se faz necessário aplicar um modelo matemático de modo a obter a melhor representação possível da estrutura, usando-se um critério de minimização devidamente selecionado, podendo-se citar: Mínimos Quadrados, Markov e Máxima Verossimilhança, entre outros, para identificação do valor do módulo de elasticidade da viga. Com isso pretende-se estabelecer uma forma confiável e prática para se efetuar uma análise dinâmica para esse tipo de estrutura, buscando uma correlação entre os módulos de elasticidade experimental e teórico.

O módulo de elasticidade é um parâmetro físico, cuja identificação é de extrema importância para a análise estrutural estática e dinâmica. Sabe-se que esse parâmetro pode ser identificado de forma mais precisa utilizando-se, por exemplo, técnicas de retroanálise. Sendo assim, um dos pontos primordiais do projeto é utilizar um modelo matemático pré-determinado sobre o qual será identificado o módulo de elasticidade de uma viga de concreto protendido com resistência pré-definida.

Inicialmente procurou-se compreender o funcionamento do método de minimização dos Mínimos Quadrados e verificar a sua viabilidade na aplicação do problema apresentado. Posteriormente foram realizados ensaios experimentais na viga de concreto protendido a fim de se obter o valor do primeiro modo de vibração, através das frequências naturais da estrutura obtidas por meio de instrumentação adequada. A obtenção das frequências naturais experimentais baseou-se na aquisição dos sinais vibratórios emitidos pela viga devido a um impacto produzido por uma marreta instrumentada. Os sinais captados pelos acelerômetros foram processados por um software de análise dinâmica que forneceu a frequência com que a viga vibrou livremente, ou seja, a frequência natural da estrutura.

Na primeira fase do projeto utilizou-se o software SAP-2000 (Structural Analysis Program) para a modelagem simples da viga de concreto protendido considerando-se a força de protensão, e obtendo-se, assim, o valor da frequência natural da estrutura numericamente. Através dessa frequência natural numérica foi possível determinar o valor adequado do módulo de elasticidade numérico, ajustando-se por tentativa e erro o valor da frequência natural numérica até que essa convergisse para o valor da frequência natural experimental já conhecida previamente através dos ensaios. Quando convergidos os valores de frequência natural numérico e experimental, o valor do módulo de elasticidade foi identificado numericamente, sendo necessárias doze tentativas para a obtenção desse valor desejado.

Na etapa seguinte do trabalho identificou-se o módulo de elasticidade da viga de concreto protendido através do processo de retroanálise, utilizando as frequências naturais experimentais (medida) e analíticas, aplicando-se o método dos Mínimos Quadrados como critério de minimização de parâmetros. Para essa etapa fez-se uso do software PROMU – Programs for Model Updating (Programa para Ajuste de Modelos). Baseando-se na existência de um resíduo (ε) entre os valores das frequências naturais experimental e analítica, realizou-se um processo de minimização de parâmetros utilizando o método dos Mínimos Quadrados, a fim de zerar o valor desse resíduo. Um valor de resíduo igual à zero significa inexistência de diferença entre os valores experimental e analítico, o que implica na identificação adequada do parâmetro inicialmente desconhecido; nesse caso o módulo de elasticidade (E) da viga protendida de concreto.

Sendo o objetivo do projeto minimizar o resíduo (ε), ou seja, obter um valor mínimo para a diferença entre os valores analíticos e experimentais, procura-se valores de δp_i que levam o resíduo o mais próximo possível de zero. Assim tem-se que:

$$\{\varepsilon\} = \left[f^A(p_1 + \delta p_1, p_2 + \delta p_2, \dots, p_{np} + \delta p_{np}) \right] \{\Delta^{(E-A)}\} \cong \{0\} \quad (I)$$

onde:

- np - número de parâmetros;
- $\Delta^{(E-A)}$ - diferença entre os dados analíticos e experimentais;
- f^A - função dos parâmetros do modelo.

Aplicando Mínimos Quadrados na equação (I), chega-se ao seguinte resultado:

$$[S]\{\delta p\} = \{\Delta^{(E-A)}\} \quad (II)$$

onde:

- $[S]$ - matriz de sensibilidade conhecida;
- $\{\delta p\}$ - variação dos parâmetros;
- $\{\Delta^{(E-A)}\}$ - vetor diferença.

Dessa forma, a solução desse sistema leva aos valores de δp_i que minimizam o resíduo.

Para o projeto em questão o parâmetro (p_i) a ser ajustado é o módulo de elasticidade (E) da viga protendida de concreto. Para obter a solução do sistema da equação (II), e assim encontrar os valores desejados para o parâmetro em análise, foi utilizado o software PROMU - Programs for Model Updating, desenvolvido no DEM/FEIS, UNESP – Ilha Solteira, contando com o auxílio do Professor Dr. João Antonio Pereira do Departamento de Engenharia Mecânica da FEIS-UNESP.

Inicialmente foi realizada, com o auxílio do PROMU, uma minimização do resíduo considerando-se somente o primeiro modo de vibrar. Essa minimização levou o resíduo ao valor zero, pois se for feita a diferença entre a frequência natural medida (fx) e analítica (fa) tem-se o valor zero como resultado. Então se percebe que o módulo de elasticidade foi identificado por um processo de retroanálise, porém considerando-se somente o primeiro modo de vibrar da viga.

Então para a realização de uma análise mais completa, bem como para a obtenção de um valor mais confiável para o módulo de elasticidade, em substituição à análise feita considerando-se apenas o 1º modo de vibrar da viga, foi realizada também se considerando o 1º e o 2º modo de vibrar. Concluindo-se a análise para os dois primeiros modos de vibrar, identificou-se o valor do módulo de elasticidade, conforme ilustra a figura 1, utilizando-se somente três iterações tendo como base a minimização do resíduo, conforme ilustra a figura 2.

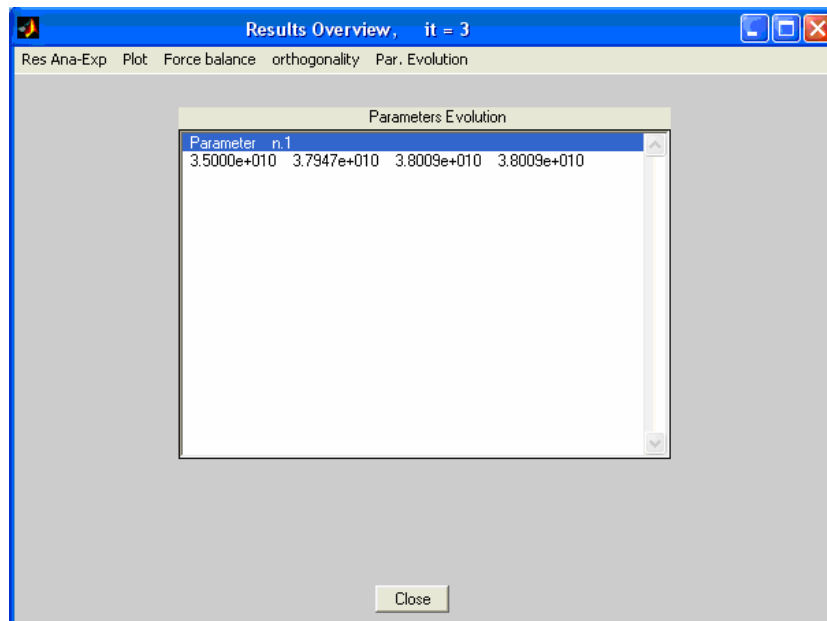


Figura 1 – Valor do módulo de elasticidade analisando-se o 1º e o 2º modos de vibrar.

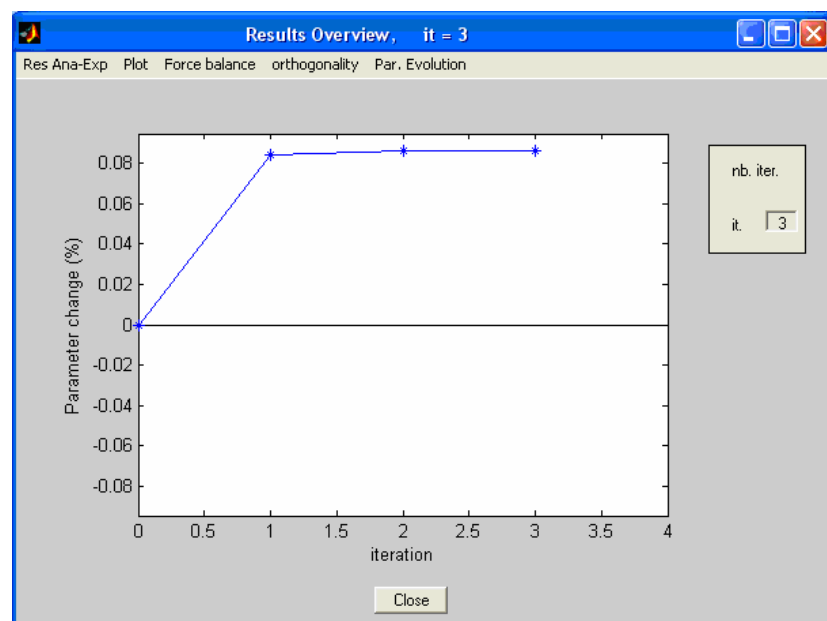


Figura 2 – Acréscimo no valor do módulo de elasticidade da estrutura.

Dessa forma, fica claro que a aplicação de retroanálise é viável para esse tipo de problema, pois identifica de maneira rápida e confiável o parâmetro desejado, utilizando um método de minimização simples e eficiente, baseando-se na obtenção de um resíduo nulo para a diferença entre os valores medidos e analíticos.

Referências Bibliográficas

CASTRO, A.T. Métodos de retroanálise na interpretação do comportamento de barragens de betão. Lisboa, 1998. 244p. Tese (Doutorado) Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

FAIRBAIRN, E.M.R. et al. Durability assessment of an arch dam using inverse analysis with neural networks and high performance computing. 13th ASCE ENGINEERING MECHANICS DIVISION CONFERENCE.

FLETCHER, R. Pratical methods of optimization. Chichester, John Wiley, 1980. v.1.

LEDESMA, A. Identificación de parámetros en geotecnia: aplicación a la excavación de túneles. Barcelona, 1987.181p.Tesis (Doctorado) – Escuela Técnica Superior di Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universita Politécnica de Catalunya.

PEREIRA, J.A. Structural damage detection methodology using a model updating procedure based on frequency response functions – FRF's. Campinas, 1996. 170p. Tese (Doutorado) Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

THOMSON, WILLIAM TYRRELL Teoria da vibração com aplicações – Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1978.

VERÍSSIMO, G. S. Concreto protendido perdas de protensão (Notas de aula – Universidade Federal de Viçosa, 1998).

Bolsa: CNPq/PIBIC