

ANÁLISE PSEUDO – DINÂMICA DE BANCOS AUTOMÓVEIS UTILISANDO UM ALGORITMO COMPLEMENTAR DE NWMARK

Carneiro, J.¹; Melo, F.²; Teixeira, V.¹; Costa, M.F.¹

¹Departamento de Física, Universidade do Minho

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

RESUMO

Descreve-se a aplicação das técnicas pseudo-dinâmicas (PsD) na análise das deformações de um banco automóvel, sujeito ao efeito das forças que resultam da acção de um passageiro durante uma colisão. A certificação laboratorial deste tipo de componentes é habitualmente baseada na aplicação de deformações plásticas o mais próximo quanto possível daquelas que ocorrem devido à desaceleração abrupta durante um acidente. O trabalho apresentado utiliza um procedimento alternativo para efectuar o teste, onde a acção das forças de inércia resultantes da súbita desaceleração durante uma colisão são aplicadas ao longo de uma sequência de intervalos de tempo usando um procedimento híbrido que combina uma aproximação numérica e uma etapa experimental, constituindo assim o método PsD.

1 - INTRODUÇÃO

O processo de homologação de bancos de veículos automóveis exige a realização de ensaios que visam conhecer o seu desempenho estrutural/material como resposta às solicitações dinâmicas resultantes de abruptas desacelerações em condição de colisão. A investigação da integridade dos componentes que constituem o banco obriga a que as acções que ocorrem em situação de acidente sejam simuladas com precisão. Tradicionalmente esta tarefa consiste em efectuar um ensaio dinâmico real em catapulta hidráulica, obtendo-se uma resposta quase real da condição de acidente. Contudo, o equipamento é complexo, dispendioso e permite apenas conhecer a condição estrutural final do banco. A alternativa proposta é a utilização do método PsD. Este, é controlado *on-line* por computador, onde as acções dinâmicas reais são simuladas de modo *quasi* estático, e a resposta dinâmica real é avaliada em cada instante de tempo. Com efeito, as

características mecânicas do modelo ensaiado, rigidez e amortecimento são realisticamente introduzidas no processo, uma vez que são as forças interiores lidas por células de carga instaladas ao nível dos graus de liberdade que são considerados no problema.

Com o método PsD, é possível modelar de modo bastante exacto o comportamento real de uma estrutura, num sistema de ensaios que é totalmente automatizado. Além disto, a técnica PsD permite também localizar e isolar comportamentos e eventuais problemas estruturais que nos ensaios convencionais não seriam perceptíveis ou seriam de percepção difícil e demorada, levando mesmo à necessidade de se realizarem protótipos evolutivos intermédios. Com efeito, este procedimento associa a vantagem de identificar o mecanismo de colapso e estado de tensão, permitindo a optimização da geometria e dos materiais a utilizar.

2 - PRINCÍPIO DO MÉTODO

Em análise dinâmica, o comportamento dinâmico de uma estrutura referido a um determinado instante de tempo fica definido a partir da equação de equilíbrio:

$$[M]\ddot{U}_{t+\Delta t} + [D]\dot{U}_{t+\Delta t} + R_{t+\Delta t} = F_{t+\Delta t} \quad (1)$$

onde \ddot{U} , \dot{U} e U são, respectivamente, os vectores aceleração, velocidade e deslocamento e F representa o vector força que é externamente aplicado (este corresponde à solicitação dinâmica externa), enquanto que $[M]$, $[D]$ e $[K]$ são respectivamente as matrizes de massa, amortecimento e rigidez. Resolvendo para $R_{t+\Delta t}$, a força interna de reacção, obtém-se:

$$R_{t+\Delta t} = F_{t+\Delta t} - [M]\ddot{U}_{t+\Delta t} - [D]\dot{U}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

Adoptando os conceitos cinemáticos de aceleração e velocidade média, é possível escrever para a estrutura os valores actuais da aceleração e velocidade a partir dos seus valores cinemáticos anteriores:

$$\begin{aligned} \ddot{U}_{t+\Delta t} &= \frac{2}{\Delta t}(\dot{U}_{t+\Delta t} - \dot{U}_t) - \ddot{U}_t \\ \dot{U}_{t+\Delta t} &= \frac{2}{\Delta t}(U_{t+\Delta t} - U_t) - \dot{U}_t \end{aligned} \quad (3)$$

A substituição das Eq. (2) e (3) na Eq. (1) produz uma versão do algoritmo de Newmark que define iterativamente a configuração dinâmica da estrutura em cada instante de tempo:

$$\begin{aligned} R_{t+\Delta t} + \frac{2D}{\Delta t}U_{t+\Delta t} + \frac{4M}{\Delta t^2}U_{t+\Delta t} &= \\ = F_{t+\Delta t} + U_t \left(\frac{2D}{\Delta t} + \frac{4M}{\Delta t^2} \right) + \dot{U}_t \left(D + \frac{4M}{\Delta t} \right) + M\ddot{U}_t \end{aligned} \quad (4)$$

Num processo não linear de incrementação da deformação, a estrutura deverá sofrer um deslocamento actual, $U_{t+\Delta t}$ que depende do valor actual da flexibilidade da estrutura deformada. Por isso, o valor actual do deslocamento pode ser calculado da seguinte maneira:

$$U_{t+\Delta t} = U_t + (R_{t+\Delta t} - R_t) \times C_t \quad (5)$$

onde $C_t = (K_t)^{-1}$ representa o valor actual da matriz tangente de flexibilidade da estrutura avaliada no instante $t+\Delta t$. Substituindo a Eq. (3) na Eq. (4) e separando os termos para o instante $t+\Delta t$ e t respectivamente, obtém-se uma nova solução para a força interna de reacção, $R_{t+\Delta t}$ que define a evolução do estado dinâmico da estrutura:

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{2D}{\Delta t}C_t + \frac{4M}{\Delta t^2}C_t \right) R_{t+\Delta t} &= \\ = F_{t+\Delta t} + \left(\frac{2D}{\Delta t} + \frac{4M}{\Delta t^2} \right) C_t R_t + \left(D + \frac{4M}{\Delta t} \right) \dot{U}_t + M\ddot{U}_t \end{aligned} \quad (6)$$

Esta equação representa a forma complementar do método pseudo-dinâmico, onde neste caso, o valor do novo vector de força interna de reacção, $R_{t+\Delta t}$ é calculado a partir do seu valor anterior e com a contribuição dos vectores velocidade e aceleração referentes ao instante anterior em conjugação com o valor actual da matriz tangente de flexibilidade da estrutura.

Na verdade, prescrevendo à estrutura em ensaio a força $R_{t+\Delta t}$, é possível medir experimentalmente o deslocamento $U_{t+\Delta t}$. Deste modo, usando a Eq. (3) os valores actualizados de $\dot{U}_{t+\Delta t}$ e $\ddot{U}_{t+\Delta t}$ podem ser imediatamente calculados de forma a poder dar sequência ao processo iterativo. O processo progride através da renomeação de $R_{t+\Delta t}$ por R_t e o mesmo para a velocidade e aceleração da estrutura; ou seja $\dot{U}_{t+\Delta t}$ por \dot{U}_t e $\ddot{U}_{t+\Delta t}$ por \ddot{U}_t . A principal vantagem deste algoritmo consiste na imposição experimental de uma força ($R_{t+\Delta t}$) à estrutura em ensaio (utilizando cilindros servo-hidráulicos) em vez de se optar por prescrição de um deslocamento. De facto, os valores de força a impor à estrutura em ensaio podem ser controlados de modo muito mais económico e muito menos complexo quando comparado com a imposição de deslocamento, como obriga o método pseudo-dinâmico convencional Melo et al. (2001). As forças instaladas na estrutura são avaliadas através de células de carga instaladas nas extremidades das

hastes dos cilindros. À medida que a estrutura se deforma, o campo de deslocamentos é medido experimentalmente, usando uma régua de impulso magnético. A estrutura movimenta-se até que os valores lidos pela célula de carga sejam iguais (ou próximos) dos valores da força prescrita de modo numérico. Os valores experimentais (forças internas de restituição e deslocamentos) são realimentados no algoritmo numérico a fim de possibilitar o cálculo das forças a prescrever, referentes ao passo iterativo seguinte (Pegon 2001; Molina et al 2000; Donea et al. 1990; Kakaliagos 1994; Donea et al 1994). Este procedimento é repetido até que toda a história temporal seja obtida. Deste modo, o sistema irá operar muito mais rapidamente já que, não existe a necessidade de se efectuarem correcções ao deslocamento, se a formulação convencional fosse usada. O método PsD assegura que, em qualquer “time step”, seja a própria estrutura a responder de acordo com o seu comportamento físico efectivo, seja ele linear ou não. O algoritmo do método PsD está esquematizado na Fig .1 através do seguinte diagrama:

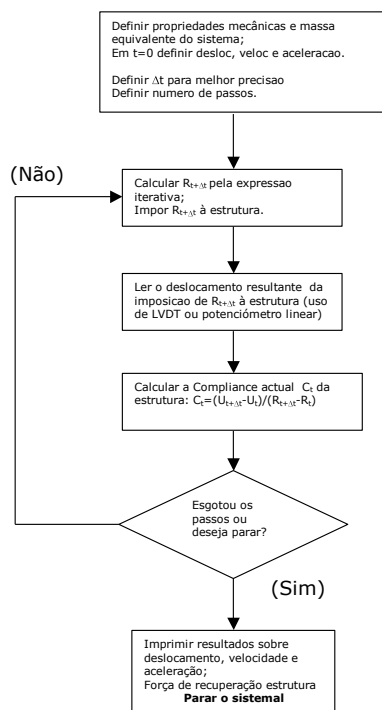


Fig. 1 - Diagrama de sequência do modo operativo do método pseudo-dinâmico.

3 - APLICAÇÃO DO MÉTODO

A fim de ilustrar o modo operativo do método descrito, descreve-se em seguida a realização de um teste pseudo-dinâmico referente a um banco automóvel de categoria M_2 .

Por uma questão de economia e simplificação do método operativo, o modelo foi matematicamente tratado como equivalente a um sistema de *1 grau de liberdade* (SDOF). No modelo matemático, o ocupante é tratado como sendo constituído fundamentalmente por duas zonas anatómicas: a primeira, constituída pelo tórax, braços e cabeça e, a segunda constituída pela anca e as pernas. Contudo e atendendo ao facto de que em situação de colisão, a zona anatómica que é principalmente mobilizada pela actuação das forças de inércia corresponde ao conjunto tórax, braços e cabeça, o modelo SDOF é satisfatório para este projecto. Com efeito, antevendo-se a grande estabilidade da base do banco (rigidamente solidarizado ao chassis do automóvel), já que este deverá assegurar que o passageiro não será projectado para fora do posto de condução, e que a estrutura do banco correspondente ao encosto sofrerá uma distorção considerável, é de prever que a zona anatómica que merece maior preocupação corresponda ao conjunto tórax, braços e cabeça. De facto, uma deficiente deformação do encosto do banco poderá aumentar consideravelmente a força do cinto de segurança contra o tórax e funcionar como fonte potencial de lesões. Por outro lado, uma considerável distorção ao nível do encosto não deixa de ser positiva para a segurança do passageiro, uma vez que esta característica estrutural permite reduzir a força do cinto de segurança contra o tórax, minimizando lesões. Por último, uma excessiva deformação ao nível do encosto poderá projectar a cabeça contra as zonas frontais do interior do automóvel e assim contribuir para a ocorrência de lesões de extrema severidade. Por tudo isto, a adopção do modelo SDOF que contempla apenas a zona anatómica tórax, braços e cabeça parece estar perfeitamente justificado já que será este conjunto que será

fundamentalmente sujeito a forças inerciais. A Fig. 2 esquematiza o modelo SDOF que serve de base para o cálculo da resposta dinâmica do banco.

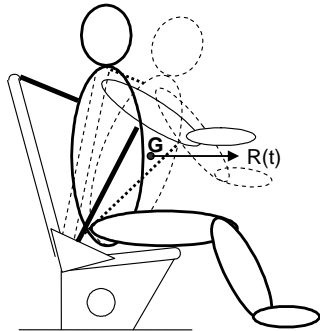


Fig. 2 - Modelo de 1 grau de liberdade que serve de base para o cálculo da resposta dinâmica do banco.

3.1 - Estrutura do Sistema de Testes PsD

A fim de conseguir explorar com sucesso as potencialidades do método pseudo-dinâmico na indústria metalomecânica ligeira, as seguintes características da estrutura de teste foram observadas:

- Um adequado número de graus de liberdade a fim de modelar com aceitável precisão o comportamento dinâmico do componente em teste. No presente caso apenas um grau de liberdade (SDOF) revela-se perfeitamente suficiente, atendendo à distribuição das massas dos elementos inerciais;
- Uma estrutura com rigidez bastante mais maior do que a do componente a ensaiar. Esta condição também foi conseguida utilizando-se elementos tubulares de elevada rigidez à flexão e utilizando a própria fundação do laboratório como estrutura complementar (fixando rigidamente o sistema ao solo);
- Actuadores e leitores de posição com precisão adequada ao método e tolerância exigida;
- Precisão em componentes de deslocamento e rotação (rótulas e guias);
- Um desenho de geometria que é adaptável ao estudo de componentes a serem submetidos a solicitações dinâmicas, de modo a permitir a observação da iniciação e evolução de eventuais danos estruturais.

As características construtivas do sistema cinemático destinado à solicitação pseudo-dinâmica dos bancos de automóvel são essencialmente as seguintes:

1. Uso de um mecanismo tipo paralelogramo destinado a reduzir o comprimento da estrutura e garantir o funcionamento do cilindro pneumático exclusivamente à compressão da sua haste;
2. Tubos RHS de aço permitem uma construção mais leve e económica, com facilidade em executar juntas soldadas e aparafusadas (onde necessário);
3. Rótulas esféricas de precisão são usadas nos elementos do paralelogramo e em barras, simulando o cinto de segurança de sujeição do passageiro ao banco;
4. Fixação rígida do conjunto ao solo do laboratório de testes garante uma rigidez mais do que suficiente para assegurar precisão.

A Fig. 3 apresenta um esquema da vista lateral do sistema mecânico desenvolvido para o teste. O modelo do banco não corresponde à escala real, estando incluído no desenho apenas para esclarecimento da sua montagem.

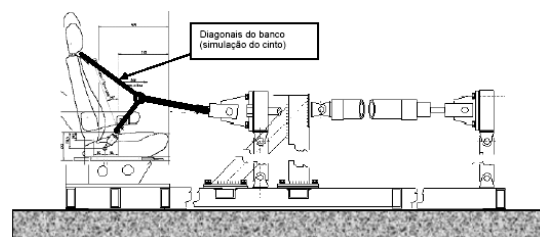


Fig. 3 - Vista lateral do sistema mecânico de teste pseudo-dinâmico de bancos de automóvel

A Fig. 4 ilustra uma vista geral do sistema de testes.



Fig. 4 - Estrutura de teste PsD usada para ensaiar um banco de um veículo automóvel

3.2 - Ensaios Efectuados

Neste trabalho, realizaram-se dois ensaios diferentes relativos à natureza dinâmica da carga:

- i) **TIPO 1:** Teste realizado com uma carga externa inferior à força limite (capaz de deformação permanente);
- ii) **TIPO 2:** Teste efectuado com uma carga externa superior à força limite (capaz de deformação permanente).

Teste PsD Tipo 1

Hipóteses assumidas para o bom desempenho do ensaio:

- Para qualquer instante do tempo, o algoritmo do método PsD calcula a flexibilidade do sistema dinâmico equivalente a fim de obter um comportamento mecânico da estrutura o mais real quanto possível; a flexibilidade pode variar mais ou menos ligeiramente durante um teste.
- Quando se prevê que o teste se efectue no limite elástico, o algoritmo prevê que se possa fixar de início um valor (estável, portanto) para a flexibilidade do sistema. Esta hipótese permite contornar aproximações que o programa efectua, as quais são mais úteis no caso de grandes deformações envolvendo uma assinalável alteração nas propriedades mecânicas (como a passagem de um módulo elástico para um módulo plástico equivalente, o que leva a grandes diferenças nos deslocamentos entre incrementos). Durante um teste efectuado dentro do limite elástico da estrutura, as correcções a efectuar à flexibilidade do modelo originam um conjunto de erros acumulados que prejudicam a convergência do processo, dado que num teste em regime elástico, a rigidez da estrutura é bastante elevada e como tal, os incrementos nos deslocamentos são pequenos. O teste efectuado mostra como os resultados obtidos com este procedimento se ajustaram bem aos valores obtidos por análise teórica.

A flexibilidade inicialmente medida (vários ensaios a fim de assegurar um valor médio repetitivo) foi assumida como $C(t=0) = C_0 = 1.81 \times 10^{-5} \text{ m/N}$.

Deste modo, os seguintes parâmetros foram considerados no ensaio:

- Força de solicitação externa: $F(t) = 500 \text{ N}$ (impulsiva, aplicada no instante $t = 0$ e mantida);
- Massa equivalente (cabeça, tronco e parte da estrutura das ancas do manequim) $M_0 = 50 \text{ kg}$;
- Incremento temporal:

$$\Delta t = 1/10 \times 2\pi \sqrt{M_0 C_0} = 0.0189 \text{ s},$$

(assumido $\Delta t = 0.01 \text{ s}$)

O resultado para o deslocamento em função do tempo, medido ao nível do tirante de aplicação de força interna R_t encontra-se apresentado na Fig. 5.

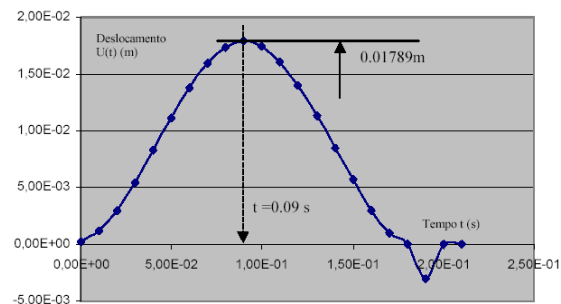


Fig. 5 - Deslocamento medido no ponto de aplicação de R_t em função do tempo.

Teste PsD Tipo 2

Neste ensaio, o banco foi solicitado por uma força de natureza impulsiva com intensidade $F = 3 \times 10^3 \text{ N}$, aplicada no instante $t = 0$ e mantida durante o ensaio. O efeito dinâmico da aplicação da força $F = 3 \times 10^3 \text{ N}$ equivale estaticamente a uma força de $6 \times 10^3 \text{ N}$. Variações acentuadas da flexibilidade da estrutura são automaticamente corrigidas pelo algoritmo efectuando uma aproximação linear entre um valor inicial e o valor final da flexibilidade no instante em que esta varie de modo acentuado (cerca de 20% foi a tolerância para a referida correcção).

O resultado para o deslocamento em função do tempo, medido ao nível do tirante de aplicação da força interna R_t encontra-se apresentado na Fig. 6.

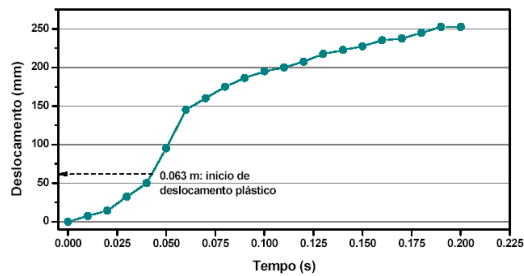


Fig. 6 - Deslocamento do ponto de aplicação da força R_1 para uma força externa $F=3\text{KN}$

A Fig. 7 ilustra a configuração geométrica do banco ensaiado após a cessação de aplicação da carga de 3KN .



Fig. 7 - Deformação apresentada pelo banco após ter sido sujeito a uma força externa $F=3\text{KN}$

4 - DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Relativamente ao teste PsD tipo 1, os resultados mostram os seguintes parâmetros de comparação com a teoria de modelação de solicitações dinâmicas no caso de um grau de liberdade:

- Deslocamento máximo medido $U_{tmax}=0.0178\text{m}$;
- Deslocamento máximo para esta solicitação: duplo do deslocamento apresentado em regime de aplicação estática da força

$$U = 2 \times F_0 \times C_0 = 2 \times 500 \times 1.809 \times 10^{-5} = 0.018\text{m};$$

- Período de oscilação natural: foi suposto que o sistema pode vibrar sem amortecimento; o período natural é de 0.189s (como foi calculado acima) e o que foi experimentalmente obtido é de aproximadamente 0.18s .

Estes resultados mostram uma boa concordância com os valores obtidos no ensaio experimental.

Relativamente ao teste PsD tipo 2, a deformação apresentada pelo banco depois de submetido a uma força $F=3\text{KN}$ aplicada dinamicamente como anteriormente descrito foi da ordem de 250mm . Neste caso, o ensaio foi interrompido no instante em que se observava a estabilização do deslocamento no valor máximo. Nesta ocasião, o facto de se lidar com valores de deslocamento muito semelhantes em cada ciclo leva a que mesmo para pequenos arredondamentos, o cálculo da flexibilidade da estrutura em cada incremento não tenha rigor, obrigando o programa a constantes sub-incrementos na tentativa de recuperar a convergência. Trata-se de uma etapa que se resolverá numa fase posterior; no entanto, pode-se registar o bom desempenho na fase de carregamento, até à etapa de estabilização dos deslocamentos (segundo-se a recuperação elástica, não menos importante porque determina uma aceleração em sentido contrário à que o manequim tem sido submetido).

5 - CONCLUSÕES

O método apresentado constitui uma aplicação de interesse para a avaliação da resposta dinâmica/estrutural de componentes específicos da engenharia automóvel. Neste contexto, a aplicação do método PsD como procedimento alternativo aos ensaios dinâmicos convencionais, mostrou ser uma ferramenta precisa e de instalação bastante económica em laboratórios dispondo de arquitectura insuficiente para testes dinâmicos efectuados em tempo real. Além disto, há que realçar que o risco de acidente devido a um eventual colapso da estrutura durante o teste é bem menor do que seria de prever num ensaio dinâmico convencional; na verdade, o investigador tem um controlo total sobre o ensaio, na medida em que o pode interromper sempre que o desejar. Com o método PsD, é também possível identificarem-se as zonas de iniciação do dano estrutural, contribuindo deste modo para uma optimização da geometria e dos materiais utilizados no fabrico dos bancos automóveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho expressam o seu agradecimento à ADI – Agência de Inovação – que suportou financeiramente o projecto NDT-AUTO 13-02-03-FDR-01281. Um agradecimento muito especial para o consórcio deste projecto, designadamente a TecMinho e a SUNVIAUTO - empresa de componentes automóveis que através de todo o seu apoio logístico, técnico e material em muito contribuíram para o sucesso deste projecto.

REFERÊNCIAS

Donea, J., Jones, P.M., Magonette, G., Verzeletti, G. 1990. The Pseudo-Dynamic Test Method for Earthquake Engineering, Report EUR 12486 EN, Safety Technology Institute, Commission of the European Communities, JRC, Ispra, Establishment.

Donea, J., Magonette, G., Negro, P., Pegon, P., Pinto, A.V., Verzeletti, G. 1994. Pseudo – Dynamic Testing of Large –Scale Models of Civil Engineering Structures at ELSA reaction Wall, Proc. Of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna.

Kakaliagos, A. 1994. Pseudo-Dynamic Testing of a Full Scale Three-Story One-Bay Steel Moment-Resisting Frame. Experimental and Analytical Results, Report EUR 15605 EN, Safety Technology Institute, Commission of the European Communities, JRC, Ispra Establishment.

Melo, F. J. Q., Carneiro, J.A. O., Lopes, H. R. and Rodrigues, J. F. D. 2001. The Dynamic Analysis of Piping Systems Using Pseudo-Dynamic Techniques, Journal of Strain Analysis, ImechE Vol 36 No 5, p. 441-451.

Molina, F. J., Verzeletti, G., Magonette, G., and Taucer, F. 2000. Dynamic and Pseudodynamic responses in a two storey building retrofitted with rate-sensitive rubber dissipators, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand.

Pegon, P. 2001. Alternative Characterization of Time Integration Schemes, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 190 p. 2707-2727.