

Uma Abordagem Preliminar Para o Estudo de Sistemas Dinâmicos Não Lineares:

Um Enfoque na Dinâmica Veicular

Igor Corazza Pereira¹, Roberto Dalledone Machado², Thiago de Oliveira Abeche³, Marcos Arndt⁴

Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE)

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba-PR, Brasil

igorcpereira@gmail.com¹, rdm@ufpr.br², abeche@ufpr.br³, arndt.marcos@gmail.com⁴

Resumo—Este trabalho apresenta ideias básicas sobre os temas da Mecânica do Dano, Dinâmica linear e não linear e a Dinâmica Veicular. É apresentado uma breve Revisão Bibliográfica assim como uma Fundamentação Teórica dos assuntos estudados.

Palavras-chave—dinâmica veicular; mecânica do dano; elementos finitos;

I. INTRODUÇÃO

Para fazer um estudo detalhado do assunto é necessário um bom conhecimento em algumas áreas da engenharia, entre elas a dinâmica de estruturas e de veículos, bem como a mecânica do dano. No entanto, solucionar estes problemas pode ser não algo trivial. Para isso, pode-se utilizar ferramentas matemáticas poderosas que possuem conceito físico, da área de concentração em Métodos Numéricos em Engenharia, como o Método dos Elementos Finitos que, por sua simplicidade e vasto campo de aplicação, é atualmente uma ferramenta de cálculo universalmente consagrada [2].

Segundo Soriano [3], o MEF é uma técnica utilizada para desenvolver soluções aproximadas à problemas de valores de contorno. O método consiste em dividir o domínio da solução em um número finito de subdomínios mais simples.

É sobre esse contexto que este trabalho apresenta uma abordagem preliminar necessária ao estudo de sistemas dinâmicos lineares, com enfoque na dinâmica não linear de veículos.

II. TÓPICOS SOBRE O ASSUNTO

A. Dinâmica linear e interação dinâmica entre veículo e irregularidades da ponte

Machado e Bernardes [4] desenvolveram um modelo de VBI, *Vehicle-Bridge-Interaction*, para analisar a influência da rigidez da mola, do amortecimento da suspensão e da velocidade do trem no movimento acoplado da interação entre veículo, irregularidades e ponte.

Anteriormente, Beghetto [1] desenvolveu um sistema similar para um veículo mais complexo, mas com interação desacoplada com a ponte. Posteriormente, Beghetto [5] desenvolveu um modelo de veículo tridimensional ainda mais complexo em para sua interação dinâmica com uma ponte ferroviária considerando o contato entre a roda e o trilho,

através das teorias de *Hertz* e *Kalker*, as irregularidades da via e a variação da velocidade. Analisou-se o fenômeno da ressonância da ponte para certas velocidades do veículo.

B. Mecânica do dano

A ideia pioneira de dano foi introduzida por Kachanov [6]. Nesta, definiu-se dano como a medida em que materiais utilizados na engenharia perdem sua força e resistência devido a acumulação de alterações microestruturais quando submetidos a esforços mecânicos e a fatores ambientais desfavoráveis. Para estes acúmulo de alterações, o dano é aumentado.

Posteriormente, Lemaitre e Desmorat [2] estabeleceram que a mecânica do dano aplica-se a todos os materiais, incluindo metais e ligas, polímeros, elastômeros, compósitos, etc., pois mesmo que os mecanismos da danificação sejam diferentes em uma micro escala, eles têm mais comportamentos similarmente qualitativos sobre a meso ou macrométrica escala.

C. Dinâmica não linear

De acordo com Abeche [7], no caso de deterioração de algum material, as forças não são mais linearmente dependentes dos deslocamentos, caracterizando não linearidade física. Tal consideração física pode aumentar grandemente o nível de complexidade nas análises estáticas. Ao considerar tais efeitos nas análises dinâmicas, a complexidade se torna muito maior e traz grandes dificuldades de convergência numérica que de fato representem os fenômenos físicos. Para tais desenvolvimentos, Abeche sugere conhecer essencialmente três diferentes áreas: a mecânica envolvida, procedimentos de análise numérica e implementação computacional.

A impossibilidade em se obter uma solução exata de um fenômeno físico é, dentre outros, devido a natureza complexa das equações diferenciais, mas pode também ocorrer devido a problemas iniciais ou mesmo a condições de contorno. Em muitos casos corriqueiros da engenharia, nem sempre é possível encontrar uma solução analítica ou idealizar uma solução perfeita. Consequentemente, a engenharia faz interpolações numéricas que aproximam valores exatos, calculados em um número específico de pontos, procurando respostas mais precisas para a solução real [8].

III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Mecânica do dano

Para Kachanov [9], o parâmetro utilizado na literatura para descrever o dano é conhecido por ω . Se o material não sofreu qualquer dano então $\omega = 0$. Como não existe uma recuperação do dano, o valor de ω é sempre crescente. Sua medição direta é impossível e a escolha do parâmetro de dano não é simples, mas a mesma pode ser feita por uma análise microestrutural, ou por uma generalização de dados experimentais. No caso mais simples, ω pode ser uma função escalar e em um caso mais complexo pode ser uma função tensorial.

B. Equação geral da dinâmica

Seja a equação linear da dinâmica estrutural, no caso mais geral:

$$[M_B] \{\ddot{U}_B\} + [C_B] \{\dot{U}_B\} + [K_B] \{U_B\} = \{F_B(t)\} \quad (1)$$

onde $[M_B]$, $[C_B]$ e $[K_B]$ são as matrizes globais de massa, amortecimento e rigidez, $\{U_B\}$, $\{\dot{U}_B\}$ e $\{\ddot{U}_B\}$ são os vetores globais de deslocamento, velocidade e aceleração da ponte e $F_B(t)$ é a força atuante no sistema ao longo do tempo.

De acordo com Abeche [7], a Eq.(1) pode ser integrada por dois tipos distintos de algoritmos: os Métodos de Integração Direta e o Método da Superposição Modal, o qual só é eficiente se apenas poucos modos de vibração forem necessários à análise ou, ainda, se o problema for localmente não linear. Por esse motivo, os problemas dinâmicos não lineares têm sido resolvidos, preferencialmente, por métodos diretos. Dentro dos métodos de integração direta citam-se o Método de *Newmark*, *Wilson*, *Park* e *Hubolt*.

C. Dinâmica veicular

O comportamento dinâmico é determinado através das parcelas de força impostas no veículos, sejam pelos pneus, gravidade e aerodinâmica. O veículo e seus componentes são estudados para determinar quais forças são produzidas por cada uma dessas fontes e, também, com o comportamento do veículo. Com esse propósito, algumas convenções são propostas por Gillespie [10] para descrever o veículo em movimento. Entre estas, destacam-se a massa concentrada, sistemas de coordenadas do veículo, variáveis do movimento, sistema de coordenadas fixas da terra, ângulos de *Euler* e forças agindo no sistema.

A Figura 1 apresenta o sistema de coordenadas da terra e do veículo.

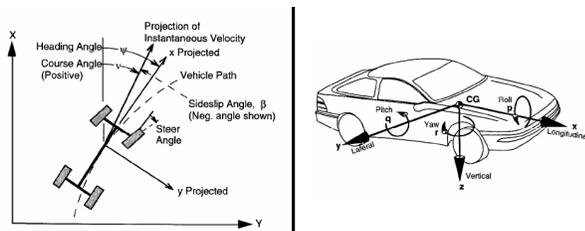


Figura 1. Sistemas de coordenadas da terra e do veículo respectivamente, adaptado de Gillespie [10]

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desse trabalho será importante para o desenvolvimento de conhecimentos nas áreas de mecânica do dano, elementos finitos e dinâmica linear e não linear, com o objetivo futuro de aprofundar a pesquisa no estudo da mecânica do dano aplicado à modelos de veículos e sua influência nas respostas dinâmicas veiculares.

V. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor gostaria de externar os agradecimentos aos demais autores do PPGMNE/UFPR pela orientação e pela confiança depositada e, também, gostaria de agradecer o suporte financeiro provido pela CAPES.

REFERÊNCIAS

- [1] F. L. M. Beghetto, Efeitos dinâmicos em modelo de veículo e ponte ferroviária diante da variação de velocidade e irregularidades verticais da via, Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2006.
- [2] J. Lemaitre, R. Desmorat, Engineering damage mechanics: ductile, creep, fatigue and brittle failures, Springer Science & Business Media, 2005.
- [3] H. L. Soriano, Elementos Finitos - Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas, Ciencia Moderna, 2009.
- [4] R. D. Machado, V. Bernardes, Dynamic Analysis of Vehicle-Bridge Interaction, in: 19th International Congress of Mechanical Engineering, 2007.
- [5] F. L. M. Beghetto, Modelagem Tridimensional da Interação Dinâmica Entre Veículo e Ponte Ferroviária Considerando Contato Roda-Trilho, Irregularidades da Via e Variação da Velocidade, Ph.D. thesis, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2011.
- [6] M. L. Kachanov, Time of the rupture process under creep conditions, *Isv. Akad. Nauk. SSR. Otd Tekh. Nauk* 8 (1958) 26–31.
- [7] T. D. O. Abeche, Modelagem Computacional da Interação Dinâmica Desacoplada entre Viga e Veículo considerando as Irregularidades da Via e a Mecânica do Dano Continuo., Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Curitiba, 2015.
- [8] T. d. O. Abeche, R. Dalledone Machado, J. E. Abdalla Filho, F. L. M. Beghetto, L. A. F. de Souza, Damaging of a reinforced concrete bridge due to dynamic effects of vehicles, in: T. N. Bittencourt, D. M. Frangopol, A. T. Beck (Eds.), Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks, 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2016), London, United Kingdom: CRC Press, Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil, 2016.
- [9] M. L. Kachanov, Introduction to continuum damage mechanics, Brookline, 1986.
- [10] T. D. Gillespie, Fundamentals of vehicle dynamics, Society of Automotive Engineers, 1992.