



Algoritmo para Análise Estrutural de Pontes Submetidas a Cargas Móveis

José Alves de Carvalho Neto¹, Luis Augusto Conte Mendes Veloso²

¹ Universidade Federal do Pará/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/ decarvalho@ufpa.br

² Universidade Federal do Pará/ Faculdade de Engenharia Civil/ lveloso@ufpa.br

Resumo

Alguns softwares comerciais, tais como o software SAP 2000[®], possuem a opção de realizar automaticamente a análise estrutural de pontes submetidas a cargas móveis de veículo. Entretanto, dependendo do tipo de análise realizada e das características da ponte e do trem-tipo, essa análise pode requerer um alto esforço computacional demandando algumas horas de processamento. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo para análise estrutural de pontes submetidas a cargas móveis de veículos. Este algoritmo visa obter séries temporais de cargas nodais que são obtidas em função das características do trem-tipo, tais como número, peso e distância entre eixos, bem como da sua velocidade de passagem. Ao se aplicar essas cargas nodais no modelo numérico da ponte, simula-se a passagem do veículo sobre a mesma. A grande vantagem deste algoritmo é que pode ser utilizado em softwares comerciais de elementos finitos diminuindo bastante o tempo de processamento para esse tipo de análise. Nos testes realizados no software SAP 2000[®], reduziu-se o tempo de processamento em até 96% quando comparado com a opção de simulação automática para análise dinâmica submetida às cargas móveis.

Palavras-chave

Cargas Móveis; Algoritmo; Pontes; Análise Dinâmica; Tempo de Processamento.

Introdução

O desenvolvimento de programas computacionais tem-se tornado cada vez mais um processo bastante complexo. Ao mesmo tempo, a possibilidade de economizar custos, bem como a necessidade de programas mais competitivos são fatores de grande importância durante o processo de concepção e organização de um programa (FUJII, 1997). Pensando nisso, softwares comerciais de Elementos Finitos apresentam interfaces cada vez mais práticas e de fácil manuseio, porém remetendo a um aumento de processamento do modelo. No estudo de



caso em questão, visou-se obter séries temporais de momento fletores para a passagem de um veículo definido. Essas ferramentas se mostraram bem práticas, porém levaram a um considerável aumento no tempo de processamento e de esforço computacional. A criação de algoritmos que auxiliam o uso de programas de elementos finitos são bastante usuais. Esse trabalho traz um algoritmo que permite a geração de séries temporais de cargas nodais que permitem auxiliar o software SAP2000® em uma análise estrutural de resposta no tempo, visando obter uma redução significativa no tempo de processamento com uso da análise “Time History”.

Descrição da Estrutura e seu Modelo Numérico

Descrição da Estrutura

A estrutura analisada foi um viaduto em concreto armado com extensão total de 44,90 metros, constituída por um vão isostático de 18,00 metros, um encontro esquerdo de 15,25 metros e um encontro direito de 11,65 metros. As figuras Figura 1-a e Figura 1-b apresentam uma fotografia de uma vista geral e a seção transversal em forma de “π”. Por simetria foi adotada somente meia seção para o modelo de elementos finitos. O viaduto sobre a CFN 1º travessia corresponde à obra de arte especial de número 01 (OAE 01) da Estrada de Ferro Carajás, situada próxima à cidade de São Luis.

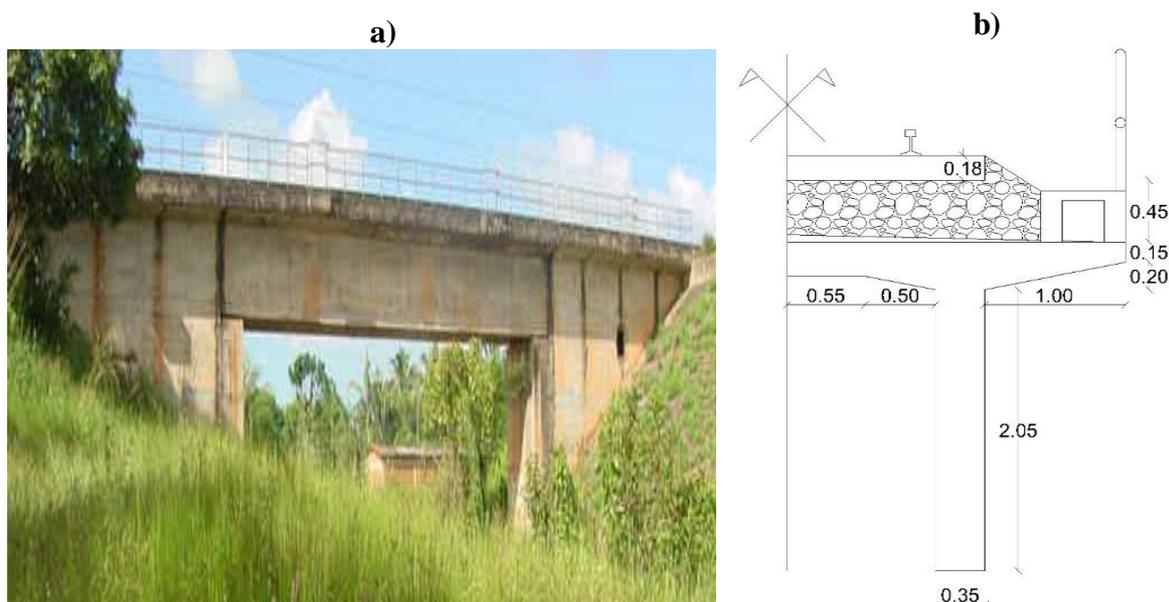


Figura 1 – a) Vista do viaduto (VALE, 2003); b) Meia seção transversal do viaduto.



Modelo Numérico em Elementos Finitos

Para a representação do viaduto foi criado em elementos finitos um modelo do viaduto conforme apresentado na Figura 2. Foram utilizados 515 elementos e 483 nós. A longarina e o trilho foram modelados com elementos de barra (“frame”). As placas de apoio ou palmilhas, entre o trilho e os dormentes, foram modeladas como elementos de mola (“spring”). Para os dormentes de madeira adotou-se uma espécie de Eucalipto, *Eucalyptus Paniculata*, que foram modelados em elementos de casca (“shell”) assim como o lastro.

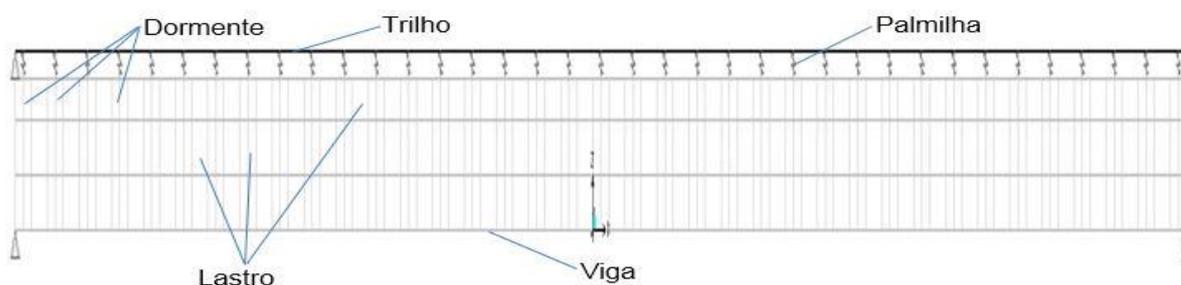


Figura 2 – Modelo numérico do viaduto.

Análise “Multi-Step”

A aplicação da análise “Multi-Step” ou de múltiplos passos para estudos estáticos ou dinâmicos é amplamente usada para verificações em pontes. Essa análise consiste na solução das equações de equilíbrio para cada instante de tempo, onde se analisa a passagem de cada eixo do veículo sobre a estrutura e enquanto houver efeito da sua passagem, (SAP2000, 2009). A análise “Multi-Step” dinâmica, adotada nesse trabalho, determina a solução para cada instante de tempo da equação de equilíbrio de dinâmico como pode se observar na equação (1).

$$K.u(t) + C.\dot{u}(t) + M.\ddot{u}(t) = f(t) \quad (1)$$

Onde: K é a matriz de rigidez; C é matriz de amortecimento; M é matriz diagonal de massa; u , \dot{u} , \ddot{u} são os deslocamentos, velocidades e acelerações da estrutura; f é a carga aplicada.

O sistema de equações é resolvido com base no método da integração direta linear implícito de Newmark. Esse método é incondicionalmente estável e permite a utilização de intervalos de tempo maiores que os métodos de integração direta linear explícita (Método da Diferença



Central), apresentando uma desvantagem quando os efeitos não-lineares são significativos e o método de Newmark precisa fatorar a matriz de rigidez efetiva (TOLEDO, 1983). Para os valores de $\gamma=1/2$ e $\beta=1/4$ o método de Newmark não introduz amortecimento artificial e como dito anteriormente é incondicionalmente estável, (CLOUGH, 2003). Outro fator importante nessa análise é a matriz de amortecimento de Rayleigh, que define o fator de amortecimento da estrutura a partir da relação entre duas frequências naturais e os coeficientes proporcionais de massa e rigidez da estrutura.

A análise “Multi-Step”, no software SAP2000[®], possui uma ferramenta que a partir das características do veículo dadas ao programa simula a passagem do mesmo, levando a um custo de processamento maior, por precisar organizar as informações do veículo na forma de processamento do programa. O processamento foi feito com os valores dos parâmetros de Newmark acima descritos. Os parâmetros para a matriz de amortecimento de Rayleigh foram obtidos fixando o valor do 1º e o 4º modo de vibração, resultando em $a_0 = 0,8057$ (coeficiente proporcional de massa) e $a_1 = 1,89 \cdot 10^{-3}$ (coeficiente proporcional de rigidez). A passagem do trem foi feita para 6 velocidades (1 m/s, 5, 10, 40, 60 e 80 km/h) para um veículo com 2 locomotivas do tipo DASH-9 e 4 vagões do tipo GDT, ver as características do trem na Figura 3. Os valores de carga por eixo adotados foram de 300 kN para os eixos da locomotiva e 325 kN para os eixos dos vagões. As análises “Multi-Step” tiveram um tempo médio de processamento de 1 hora e 30 minutos.

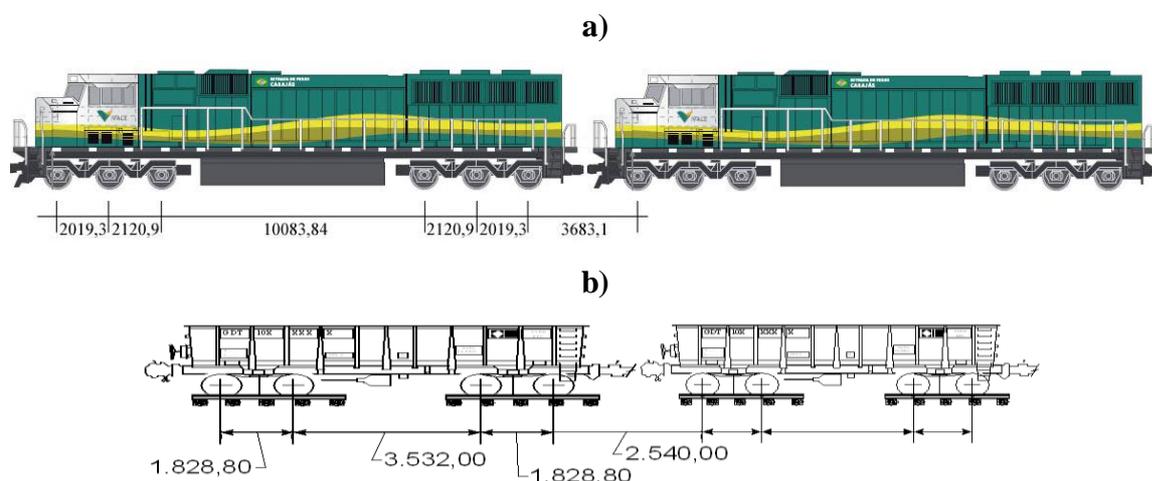


Figura 3 – Desenhos esquemáticos: a) Locomotiva DASH-9; b) Vagão GDT. Unidades em mm (NICAÉ, 2009).



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Análise “Time History”

Em busca de uma otimização nas análises adotou-se a análise “Time History” visando uma diminuição nesse tempo de processamento, que é considerado grande se levada em conta a baixa complexidade da estrutura e de seu carregamento.

A análise “Time History” ou de resposta no tempo é também amplamente usada em análises dinâmicas, e principalmente usada em casos em que o carregamento externo tem um comportamento periódico ou transiente. Assim como a análise de “Multi-Step”, a “Time History” é feita com base na solução da equação de equilíbrio dinâmico para cada instante de tempo, ver equação (1), (SAP2000, 2009), e utiliza os mesmos processos, adotando o método de Newmark (integração direta linear implícita). Adotaram-se os mesmos parâmetros da análise “Multi-Step”. A diferença entre os dois tipos de análise é principalmente que a análise “Time History” pode ser feita a partir de funções definidas no programa ou carregando arquivos de texto com os valores da função em respectivos pontos no tempo. Esse tipo de informação é rapidamente processado pelo programa, o que resulta em um tempo de processamento bastante inferior à análise “Multi-Step”.

Algoritmo de Série Temporal para Cargas Nodais

Para que essas funções fossem geradas foi implementado um algoritmo que gera funções correspondentes às séries temporais de cargas nodais, referentes a cada nó do elemento de barra representativo do trilho, que assumem valores máximos no nó e mínimo nos nós vizinhos.

Para o funcionamento do algoritmo devem ser especificados o arranjo do trem (coeficientes relativos aos pesos, distâncias entre eixos e velocidade), dados da estrutura (comprimento do vão, número de vãos e de discretizações nos vãos) e o incremento de tempo. A Figura 3 mostra o espaçamento entre eixos das locomotivas (DASH-9) e dos vagões (GDT) adotados. As cargas por eixo e o arranjo do trem adotados foram as mesmas utilizadas para a análise “Multi-Step”.

Descrição do algoritmo

O algoritmo funciona carregando os nós com cargas unitárias e aplicando deslocamentos em função da velocidade e do incremento adotado. Dessa forma, obtêm-se as funções



equivalentes à passagem dessas cargas em cada nó e o algoritmo atribui os valores de carga por eixo da composição do veículo, através de um vetor com coeficientes relativos aos eixos das locomotivas e vagões tendo como referência o primeiro eixo da locomotiva.

Com os dados de entrada informados, o algoritmo determina o comprimento da discretização do vão (d) em metros, a partir da razão entre o vão e o número de discretizações do vão. Em seguida determina-se o número de eixos com base no comprimento do vetor das distâncias entre eixos. Por fim calcula-se o tempo total de passagem e as posições de cada eixo durante a passagem do trem.

Funções

As funções foram implementadas semelhantemente ao conceito das funções de interpolação do Método dos Elementos Finitos, admitindo valores unitários no nó e nulo nos nós vizinhos com variação linear, ver Figura 4. As funções foram definidas de acordo com as equações (2) e (3).

$$f(k, i, j) = \alpha(j) \left\{ \frac{Posição(i, j) - [(k - 1)d]}{d} \right\} \quad (2)$$

$$\text{Para } (k - 1) \cdot d \leq Posição(i, j) \leq k \cdot d$$

$$f(k, i, j) = \alpha(j) \left\{ \frac{2 - [Posição(i, j) - ((k - 1)d)]}{d} \right\} \quad (3)$$

$$\text{Para } k \cdot d \leq Posição(i, j) \leq (k + 1) \cdot d$$

Em que $\alpha(j)$ é o vetor dos coeficientes referentes aos pesos por eixos do trem; $Posição(i, j)$ é a matriz posição para cada eixo j no instante de tempo i ; d é o comprimento da discretização do vão (“frame”), ou distância entre dois nós; $f(k, i, j)$ é a matriz tridimensional das funções para cada nó k e eixo j no instante de tempo i .

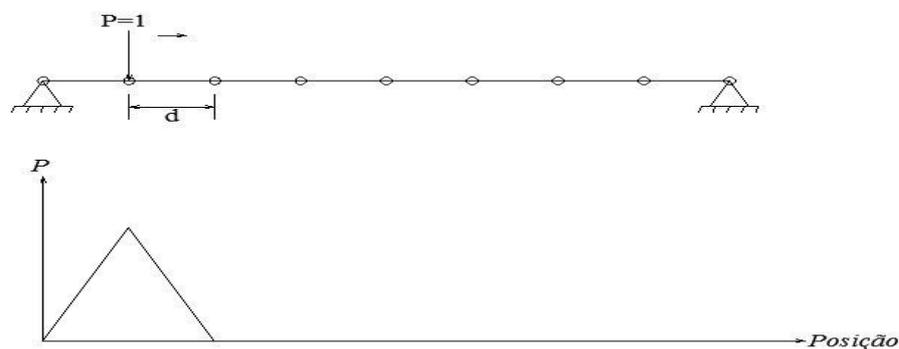


Figura 4 - Função intermediária de um eixo no segundo “nó” de uma ponte de um vão bi apoiada.

Para o nó inicial, a função é definida somente no intervalo $(k - 1)d \leq \text{Posição}(i, j) \leq kd$. Nos nós intermediários a função é definida entre dois intervalos, $(k - 1)d \leq \text{Posição}(i, j) \leq kd$. Estes também concebem uma função descontínua nos pontos kd caracterizando assim duas funções correspondentes a cada lado do intervalo, conforme mostram as equações (2) e (3). Para o nó final a função é definida somente no intervalo $kd \leq \text{Posição}(i, j) \leq (k + 1)d$. Após as definições e cálculo das funções, é feito um somatório na dimensão j , que se refere aos eixos tendo como resultado a matriz $\beta(k, i)$, que representa o efeito de todos os eixos nos k nós em cada instante de tempo i .

No último passo, o algoritmo organiza as funções obtidas em arquivos de textos equivalentes ao número de nós (k) considerados, e assim se alcançam as séries temporais das cargas nodais a serem aplicadas em um software de elementos finitos. A Figura 5 apresenta um fluxograma do algoritmo descrito.

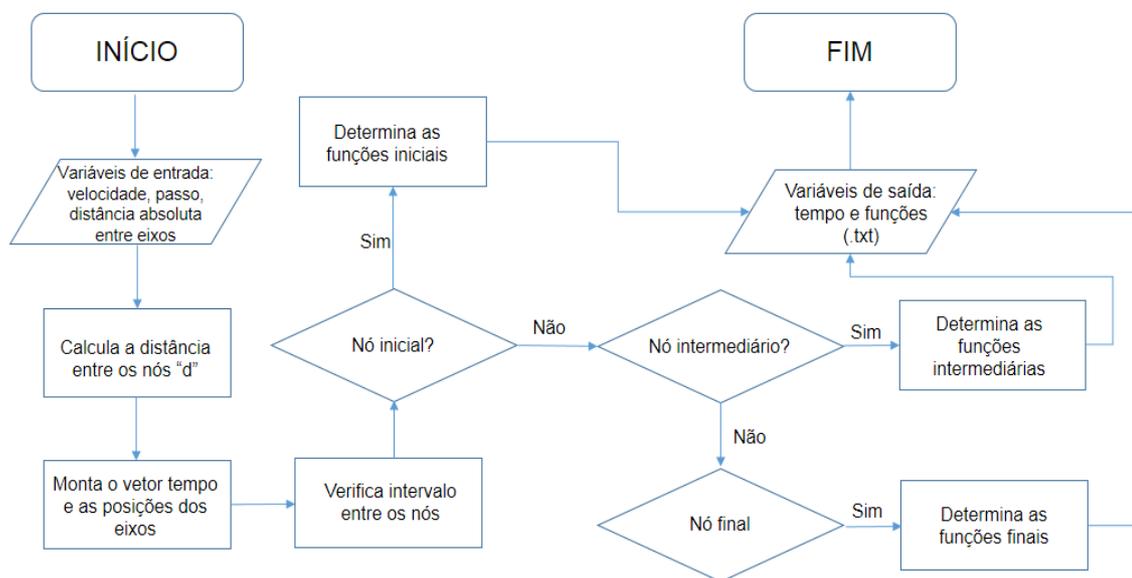


Figura 5 - Fluxograma do algoritmo.

Resultados

Para tornar possível a comparação entre as análises e validar o algoritmo implementado era necessário que os resultados fossem iguais para as duas análises. A Figura 6 apresenta a série de momentos fletores, que se desejava obter, na longarina no meio do vão extraídas do SAP2000[®] onde pode se observar praticamente os mesmos valores de momentos fletores nas duas análises, com uma mínima variação no fim da série, que não chega a uma magnitude de causar erros na consideração da série temporal.

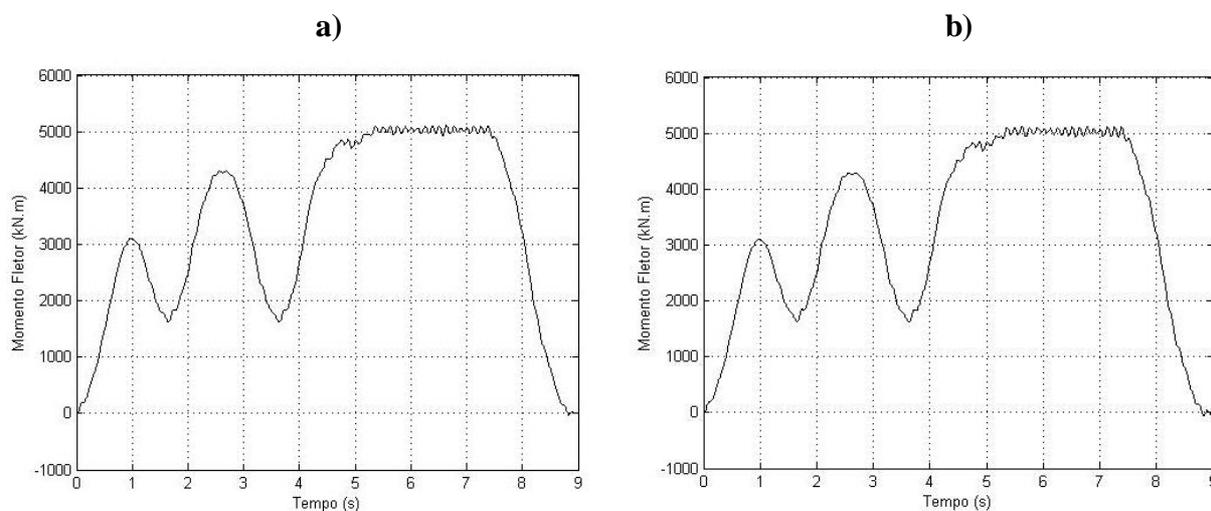


Figura 6 - Séries temporais de momentos fletores. a) Série obtida a partir da análise "Multi-Step"; b) Série obtida a partir da análise "Time History".



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

No caso da análise “Multi-Step”, o programa fez a análise dinâmica da ponte simulando numericamente a passagem do veículo. Para o caso “Time History”, o programa fez a análise dinâmica da ponte a partir das funções ou séries temporais das cargas nodais. Após as análises, comparou-se o tempo total que o programa levou para obter os resultados nas duas análises. A Tabela 1 apresenta o tempo de processamento nas análises “Multi-Step” e “Time History” no SAP2000[®]. Verifica-se uma grande redução do tempo na análise “Time History” com a utilização das séries temporais das cargas nodais. As análise “Time History” teve um tempo médio de processamento de 05 minutos e 40 segundos enquanto que a “Multi-Step foi de 1 hora 33 minutos e 40 segundos, dando um redução média de 93% no tempo de processamento.

Tabela 1 – Tempos de análises no SAP2000[®].

Velocidades	Tempo de Análises		Redução do Tempo
	MS Dinâmico	TH Funções	
1 m/s	02 h 12 min	00 h 05 min	96,2%
5 km/h	00 h 56 min	00 h 03 min	94,6%
10 km/h	00 h 28 min	00 h 03 min	89,2%
40 km/h	01 h 47 min	00 h 05 min	95,3%
60 km/h	02 h 15 min	00 h 13 min	90,3%
80 km/h	01 h 44 min	00 h 05 min	95,1%

A Tabela 1 mostra que os tempos de análise foram bastante reduzidos, chegando-se no caso da simulação com passagem do trem a 1 m/s, a uma redução de 96,2%. A Figura 7 apresenta esses valores em um gráfico de barras que permite visualizar a diferença que houve entre o tempo das análises.

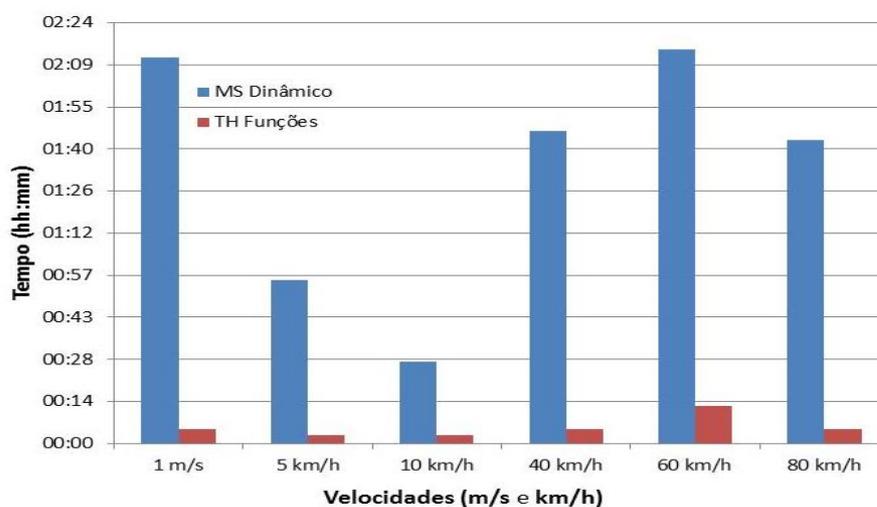


Figura 7 - Comparação dos tempos das análises no SAP2000®.

Conclusões

O algoritmo desenvolvido para gerar séries temporais de cargas nodais em modelos de elementos finitos para simular cargas móveis permitiu a redução do tempo de análise em até 96% quando comparado com a análise “Multi-Step” do SAP2000® que simula automaticamente as cargas móveis no modelo. Essa grande variação nos tempos de análise se dá principalmente pela forma em que o programa faz a estruturação dos dados antes de solucionar o sistema de equações, pois com esses resultados acredita-se que o SAP2000® requer mais tempo para buscar os dados na memória “cache” da CPU para a análise “Multi-Step” enquanto que a análise “Time History” executa mais rapidamente esse processo resultando em um menor tempo de processamento.

A análise “Time History” mostrou-se uma ferramenta bastante útil, quando se necessita de uma redução no tempo de análise, enquanto que a análise “Multi-Step” é mais facilmente manuseada pela forma em que se apresenta na interface do SAP2000®, porém tendo um custo de processamento maior. Por fim, esse algoritmo implementado pode ser utilizado para análise de pontes de muitos vãos e com veículos longos sujeitos a cargas móveis em programas de elementos finitos que não possuam essa ferramenta disponível, que requerem um grande esforço computacional, ocasionando uma grande redução no tempo de processamento.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Referências

- CARVALHO NETO, J. A. , Pesagem em Movimento e Caracterização do Tráfego Ferroviário com uso da Técnica B-WIM. 2014. 102f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.
- CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. Dynamics of Structures. Berkeley: Computers & Structures, 2003.
- FUJII, G. Análise de Estruturas Tridimensionais: Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional Orientada para Objetos. 1997. 181f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Estruturas e Fundações da EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- MATLAB - Matrix Laboratory R2012b 8.0.0.783 ©1984 - 2012, Mathworks, Inc, 3 Apple Hill Drive, Natick - MA, EUA.
- NICAE. Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação da Integridade Estrutural de Pontes e Viadutos Ferroviários ao Longo da Estrada de Ferro Carajás. Pará: NICAE-UFPA, 2009. 143p. (Relatório Técnico Segunda Etapa: Obra de Arte Especial n. 01 - Viaduto sobre a Primeira Travessia).
- SAP2000 Advanced 14.1.0 – Structural Analysis Program, ©1976 – 2009, Computers and Structures, Inc, University Ave. Berkeley, CA, EUA.
- TOLEDO, R. C. P. L. Um Estudo sobre Métodos de Integração Direta para a Análise Dinâmica Não-Linear de Estruturas. 1983. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 1983.
- VALE - GAEPG – PPCV e Engenharia - Equipe de Inspeção de Obras de Arte Especiais. RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DO VIADUTO SOBRE A EFSLT (1º Travessia). Maranhão: DILO – VALE, 2003. 80p.