

MOISÉS HENRIQUE KRÜTZMANN

**UMA ANÁLISE DE HISTÓRICOS DE RESPOSTA DINÂMICA DE MODE-
LOS ESTRUTURAIS SIMULADOS ATRAVÉS DE METODOLOGIA GLO-
BAL/LOCAL, COM VISTAS AO CÁLCULO DE FADIGA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Rogério José Marczak

Porto Alegre
2011



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

UMA ANÁLISE DE HISTÓRICOS DE RESPOSTA DINÂMICA DE MODELOS ESTRUTURAS SIMULADOS ATRAVÉS DE METODOLOGIA GLOBAL/LOCAL, COM VISITAS AO CÁLCULO DE FADIGA

MOISÉS HENRIQUE KRUTZMANN

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. EDSON HIKARO ASEKA
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. JUN SÉRGIO ONO FONSECA
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. WALTER JESUS PAUCAR CASAS
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2011

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha mãe, *Rejane Maria Feyh*, pela paciência e apoio constante para realização deste trabalho.

à Universidade Federal do Rio Grande do Sul que me disponibilizou estudo gratuito e de qualidade durante estes anos de curso de Engenharia Mecânica;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Rogério J. Marczak* que conseguiu transmitir grande parte do conhecimento necessário para a conclusão deste trabalho e me guiou quando eu já não tinha mais esperanças.

ao meu grande amigo *João Cervo Calderaro*, pelas grandes discussões de problemas físicos e pelas horas de descontração.

ao amigo *Braz Dahil Cervo Calderaro* e à madrinha *Edel Ahlert*, que já não se encontram entre nós, mas com seus conselhos me ajudaram a chegar até aqui.

e enfim, aos amigos e colegas pelo companheirismo e amizade.

Procure ser um homem de valor,
em vez de ser um homem de sucesso.

Albert Einstein

KRUTZMANN, M. H. UMA ANÁLISE DE HISTÓRICOS DE RESPOSTA DINÂMICA DE MODELOS ESTRUTURAIS SIMULADOS ATRAVÉS DE METODOLOGIA GLOBAL/LOCAL, COM VISTAS AO CÁLCULO DE FADIGA. 2011. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

Este trabalho apresenta inicialmente um resumo da metodologia Global/local para análise de estruturas. Tal metodologia permite uma substancial economia de recursos computacionais, e é particularmente atrativa para solução de problemas dinâmicos complexos através do MEF. No entanto, métodos Global/local utilizam superposição de efeitos, e portanto não podem ser empregados em análises não lineares. O presente trabalho compara os resultados obtidos através da metodologia Global/local com aqueles obtidos para modelos completos de elementos finitos. Fez-se também uma comparação do número de ciclos de vida em fadiga resultantes do modelo empregando a metodologia Global/local com relação ao modelo transiente completo; sendo empregado o dano acumulado de Palmgren-Miner e o modelo de Goodman, bem como a contagem do número de ciclos feita pelo método Rainflow. Os resultados obtidos tiveram uma boa concordância em comparação ao modelo transiente completo e houve uma redução considerável no tempo de processamento.

PALAVRAS-CHAVE: Metodologia Global/local, análise dinâmica, fadiga, Rainflow

KRUTZMANN, M. H. AN ANALYSIS OF THE DYNAMIC TIME HISTORY OBTAINED BY GLOBAL/LOCAL FE STRUCTURAL MODELS, AIMING FATIGUE EVALUATION. 2011. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

This work presents initially a short review of the Global/local methodology for numerical analysis of structures. This methodology allows great reduction of computational resources and it is attractive for the solution of complex dynamic problems using the FEM. However, the Global/local methodology uses superposition of effects and therefore it can't be used in non-linear analysis. The present work compares the results obtained through the methodology with its complete FEM full transient analysis counterpart. It has also made a comparison of the number of cycles in fatigue when employing the Global/local methodology and with the complete transient time marching model. The Palmgren-Miner and the Goodman accumulated damage models were used and cycle counting was performed using the Rainflow method. The results obtained showed good agreement with the complete transient model, but with a very significant reduction of the processing time.

KEYWORDS: Global/local methodology, dynamic simulation, fatigue, Rainflow.

SUMÁRIO

ABSTRACT	-
1. INTRODUÇÃO	1
1.2. Objetivos do trabalho	2
2. METODOLOGIA DE SUBESTRUTURAÇÃO GLOBAL/LOCAL	3
3. ANÁLISE DINÂMICA	6
4. ANÁLISE DE FADIGA	6
5. ESTUDO DE CASO	7
5.1. Descrição do problema	7
5.2. Carregamento	9
6. RESULTADOS	10
6.1. Análise estática linear	11
6.2. Análise dinâmica linear	11
6.3. Estimativa da vida em fadiga	12
7. CONCLUSÕES	13
8. REFERÊNCIAS	13
ANEXOS	15

1. INTRODUÇÃO

A simulação numérica está inserida em uma etapa muito importante no projeto, a análise. Isso se deve ao fato da importância de se verificar ou até mesmo otimizar certas geometrias, seja por motivos de redução de custos ou seja pelo aumento do desempenho de certo componente. No entanto, utilizar este recurso demanda tempo e mão de obra qualificada para que os resultados esperados sejam alcançados.

Apesar da grande evolução dos códigos de processamento e capacidade de processamento dos computadores muitos problemas dinâmicos ou não lineares são de solução demo-

rada e às vezes, até sem solução devido à falta de memória dos computadores. Assim, com o intuito de reduzir o tempo de processamento em simulações numéricas desenvolveu-se uma metodologia de análise conhecida como Global/local que já é utilizada a algumas décadas. Esta metodologia apresenta uma grande vantagem na redução drástica do tempo de processamento em muitos casos e com solução muito próxima ao método transiente completo. Isso ocorre devido ao fato desta metodologia simular a área de interesse detalhadamente e simplificar o restante da mesma.

Tendo o histórico de tensões podem-se obter muitos dados como a durabilidade de certo componente ou se o componente irá se deformar demasiadamente dentre outras informações. Como o caso simulado neste trabalho foi um caso de carregamento dinâmico e grande parte das falhas provenientes deste tipo de carregamento é devido à fadiga do material, estimou-se a vida da estrutura em fadiga para um carregamento arbitrário.

1.2. Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem os seguintes objetivos:

- Simular um elemento estrutural submetido a uma carga estática utilizando a metodologia global/local e comparar o mesmo para o método analítico de viga e o simulado na forma transiente completa para o elemento de casca e para o elemento tridimensional.
- Simular um elemento estrutural submetido a uma carga dinâmica utilizando a metodologia Global/local e comparar com o obtido pelo modelo transiente completo para elemento de casca.
- Extrair uma estimativa da vida em fadiga do componente utilizando o dano acumulado de Palgren-miner e comparar com o resultado obtido pelo modelo transiente completo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A metodologia Global/local foi formulada nos anos 80 e é muito empregada em problemas de alta complexidade e que necessitem de um grande esforço computacional. Gould e Hara [1] aplicaram esta metodologia para o cálculo da tensão em pequenas aberturas em grandes torres reforçadas com concreto. O resultado obtido foi uma redução entre 1/6 e 1/8 no tempo de processamento quando comparado com o método transiente completo. S. R. Volet ET al [2] fez uma análise empregando o método de grandes escalas e obteve resultados com um erro máximo de 13,42% para a tensão de Von Mises.

N.F. Knight, Jr. et al [3] utilizou a mesma metodologia em componentes estruturais. A região que requer um maior detalhamento é identificada e uma malha é gerada para esta região. O resultado deste modelo global é usado para fornecer as condições de contorno para o modelo local com procedimentos de interpolação.

Noor et al [4] simulou problemas não lineares empregando esta metodologia. Woo and Whitcomb[5] desenvolveu macroelementos onde a região pode ter as propriedades do material heterogênea. Isso é útil para a análise de alguns materiais heterogêneos onde não é prático modelar diretamente utilizando elementos finitos tradicionais e quando não há bons resultados quando utilizando propriedades homogêneas. Muitas outras áreas utilizaram esta mesma técnica como [7] na investigação do fator de concentração para trincas e [6] na análise de falha em tecido de materiais compósitos.

Whitcomb [10] alerta que apesar dos avanços na tecnologia dos computadores existe

ainda necessidade de métodos computacionais mais eficientes para realizar análise de tensões. Uma aproximação que é recebida com uma crescente atenção é a metodologia de análise Global/local de elementos finitos. Para Haftka[14] a aproximação global tenta capturar o comportamento de uma função como um todo, por isso é pouco precisa e eficiente. Já a aproximação local é tipicamente muito precisa dentro de seu domínio de análise, pois é uma aproximação de uma pequena região da função objetivo. Sun e Mao[15] afirmam que a análise local deve ser efetuada com uma malha refinada para captar detalhadamente o nível de tensão.

Muitos autores trabalharam utilizando a metodologia Global/local, no entanto poucos a utilizaram em análises dinâmicas e menos ainda investigando não linearidades geométricas.

Um método numérico para contagem de ciclos, muito utilizado, é o Rainflow [ASTM E- 1049, 1994] foi inicialmente proposto por Matsuiski and T.Endo que contou o número de ciclos e meio ciclos a partir de sinal deformação- tempo. Esse método divide um histórico de tensões por tensão média e amplitude de tensões, agrupando os ciclos equivalentes. Radaj [11] comenta que atualmente o Rainflow é o método de contagem de ciclos preferido para análise de fadiga. Já Branco [12] acrescenta que o método Rainflow permite realizar previsões do comportamento a fadiga melhores que os outros métodos.

Segundo [8] a fadiga é um dos mais importantes modos de falha a ser considerado no projeto mecânico. Os procedimentos de análise da fadiga foram desenvolvidos a mais de 100 anos por um engenheiro alemão, W. A. S. Albert que em 1929 estudou alguns testes de carga cíclica em correntes de aço.

Segundo [9] o fenômeno de fadiga gera danos a microestrutura do material e este dano é computado pela hipótese de dano acumulado pela regra de Palmgren- Miner. Esta regra é usada para obter a vida em fadiga do material.

2. METODOLOGIA DE SUBESTRUTURAÇÃO GLOBAL/LOCAL

Quando se simula uma geometria ou modelo inicial não se está interessado nos pequenos detalhes como arredondamentos e furos, mas sim em variáveis globais do modelo como tensão e deslocamentos. Estes detalhes desprezados do modelo global precisam ser analisados para verificar se sua retirada não irá alterar as propriedades globais do modelo, sempre levando em consideração a segurança. Assim feita uma primeira análise é necessário adicionar os detalhes e refinar estes com o intuito de entender melhor o comportamento nas imediações destes. Em grande parte das vezes é junto a estes detalhes que aparecem os concentradores de tensão, sendo estes iniciadores de escoamento e surgimento de trincas o que leva a estágios posteriores ao rompimento do componente.

Uma explicação simplificada da metodologia Global-local é mostrada neste capítulo. O exemplo da placa com três furos é disposta na Figura 2.1 e para obter resultados aceitáveis a malha precisaria ser muito refinada para conseguir modelar adequadamente os furos, no entanto para contornar este problema o que se faz é refinar a malha somente junto ao furos. Esta é uma das mais simplórias aplicações desta metodologia e para um caso estático não justificaria o seu emprego. Outro caso onde pode ser aplicada esta metodologia é utilizando uma matriz de transformada pontual do componente e sabendo-se os carregamentos encontrar resultados para os campos de tensão e deslocamento. Na figura 2.1 podemos ver como a malha foi refinada na área de interesse e a malha global, que não interessa para a análise, está bem menos refinada. A seguir é apresentada a obtenção das matrizes da metodologia Global/local.

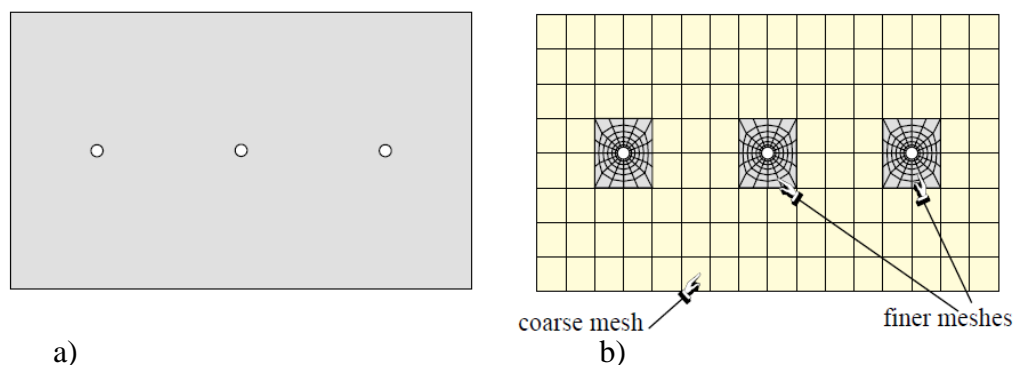


Figura 2.1- Detalhe na geometria do problema (a) Geometria e malha refinada global e local(b).

Como cada carregamento gera um deslocamento em cada nó de controle podem-se relacionar as excitações com os deslocamentos dos nós de controle através da matriz de flexibilidade \mathbf{C} que pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\{u\} = [C] \{F\} \quad (1)$$

onde u é o vetor de deslocamento dos nós de controle e f é vetor das cargas unitárias do carregamento $F(t)$. Quando o interesse é obter os históricos de tensão nos pontos críticos constrói-se um modelo local (menor e com malha bem refinada) da junta com todos os detalhes relevantes. Na Figura 2.2 é possível visualizar o modelo global (modelo de viga) e o modelo local (modelo de casca) unidos pelos pontos de influência. No entanto, cabe ressaltar que cada modelo é simulado independentemente e seus resultados processados conforme as equações 1, 2 e 3.

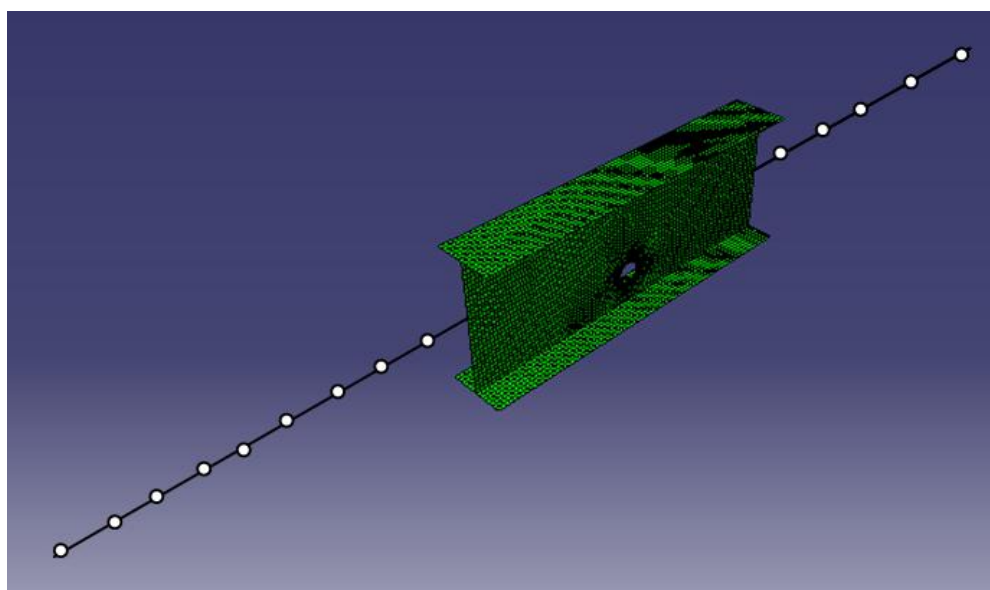


Figura 2.2- Modelo global e modelo local superpostos.

Com esse modelo é possível obter a matriz \mathbf{B} de relação entre o deslocamento em cada nó de controle e a tensão no ponto crítico P e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\{S\} = [B] \{u\} \quad (2)$$

onde u é o vetor de deslocamento unitário em cada nó de controle e S é vetor com as 6 componentes de tensões no ponto crítico P .

Substituindo a Equação 5.1 na Equação 5.2 podem-se calcular as 6 componentes tensões no domínio do tempo advinda do carregamento $F(t)$ conforme a equação:

$$\{S\} = [C][B]\{F\} \quad (3)$$

Dessa forma, conhecendo a matriz C e B de uma estrutura e a partir do conhecimento dos carregamentos impostos a estrutura no domínio do tempo pode-se calcular o histórico de tensão em um ponto específico da estrutura.

Esta metodologia de análise visa simplificar o problema para que seja possível reduzir o tempo de processamento e mesmo assim obter resultados confiáveis. Para o modelo de viga é possível obter alguns resultados, mas não consegue capturar o comportamento detalhado em furos, raios de concordância e outros concentradores de tensão. Estes acabam sendo geralmente pontos onde o modelo irá escoar inicialmente. Dessa forma conseguem-se bons resultados com modelos globais, relativamente simples, e com modelos locais dos pontos críticos bem refinados.

Caso houvesse outras cargas distribuídas ao longo da estrutura haveria a necessidade de se usar o princípio da superposição de efeitos lineares, que esta metodologia Global-local não encontra restrições ao seu uso. No entanto, quanto o objetivo é simular uma estrutura com uma não linearidade este tipo de abordagem não é recomendada por utilizar a álgebra linear para o cálculo das tensões.

MPC(Multi- point constraint) permitem fixar diferentes graus de liberdade do modelo a uma outra geometria. Os graus de liberdade e as partes a serem fixadas são definidas pelo usuário permitindo que toda a seção de certo perfil tenha os mesmos graus de liberdade. Este recurso é necessário para que as condições de contorno nos extremos do perfil em casca sejam os mesmos da estrutura tratada como uma viga.

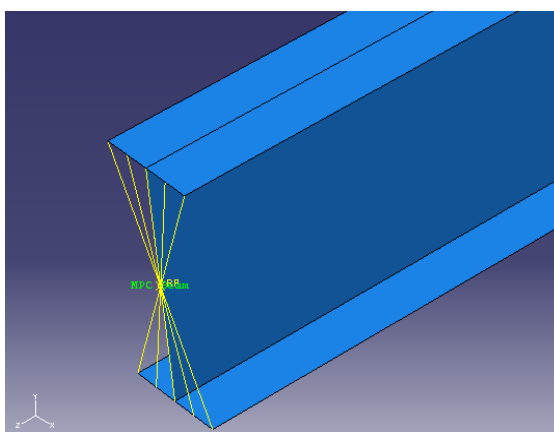


Figura 2.3- Detalhe na utilização de MPC nas extremidades da viga.

Assim toda a seção do perfil é ligada rigidamente a um ponto chamado de *slave point* e este ponto recebe todas as condições de contorno que o usuário deseja para a extremidade do modelo. Para o caso simulado foi definido como condição de contorno na face esquerda $u_1=u_2=u_3=0$ e $R_2=R_3=0$ e na face direita $u_1=u_2=0$ e $R_2=R_3=0$ com o intuito de obter as mesmas condições de contorno que uma viga biapoiada com uma força pontual entre os apoios.

3. ANÁLISE DINÂMICA

Análise dinâmica implícita é usado para solucionar problemas com baixas velocidades onde o efeito das baixas frequências domina o problema. Já a análise dinâmica explícita é recomendada para problemas envolvendo altas velocidades onde as ondas de choque dominam o intervalo de tempo e o obrigam a ser pequeno. No caso simulado neste trabalho haveria a possibilidade de se usar ambos os métodos, porém o que daria melhores resultados seria o explicit. Como o Abaqus/explicit não aceita o uso de MPCs em sua formulação e estes são essenciais para o correto modelamento da geometria, optou-se pelo uso do Abaqus/implicit utilizando um incremento de tempo baixo. Como problemas estruturais são considerados inerciais porque a resposta no tempo é longa quando comparado com o tempo requerido para as ondas percorrerem a geometria, Belytschko[13] recomenda que nestes casos a seguinte relação $\frac{\Delta t}{T} > 1/10$ seja levada em consideração para que resultados aproximados sejam obtidos, onde Δt é o incremento de tempo e T é o tempo total da simulação.

A análise dinâmica implícita utiliza MPC para governar os deslocamentos. A velocidade e a aceleração são derivadas dos deslocamentos com as relações definidas por operador de integração dinâmica de Hilber-Hughes-Taylor. Para os casos lineares, como este, as velocidades obtidas satisfazem exatamente as condições de contorno, no entanto as acelerações são aproximadas.

O tipo de elemento utilizado na análise da estrutura com elemento de viga é o B23 do software comercial utilizado e é composto por 2 nós. Possui uma formulação com uma equação de interpolação de terceiro grau o que garante melhores resultados entre os nós. Este elemento só pode ser usado para pequenos deslocamentos e quando o índice de esbeltez for maior que 10. Já o elemento de casca utilizado é com 4 nós, elemento quadrilátero e só deve ser utilizado para pequenas deformações e não considera a variação da seção com a deformação.

4. ANÁLISE DE FADIGA

Conhecendo-se a relação entre as forças aplicadas em cada suporte e o deslocamento dos nós de controle, obtidas no modelo global, e a relação entre os deslocamentos nos nós de controle e as tensões nos pontos críticos, obtidos no modelo local, pode-se calcular o histórico dos 6 componentes de tensões provocadas pela excitação senoidal.

Uma metodologia muito utilizada para aços é a tensão equivalente de Von Mises. Este critério de escoamento de Von Mises diz que a deformação plástica em um ponto do material inicia quando a tensão equivalente nesse ponto for igual a tensão de escoamento. Na Equação 4 pode-se observar a forma de obtenção da tensão equivalente de Von Mises a partir das 6 componentes de tensão calculadas em cada ponto crítico.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})^2+(\sigma_{xx}-\sigma_{zz})^2+(\sigma_{yy}-\sigma_{zz})^2+6*(\tau_{xy}^2+\tau_{xz}^2+\tau_{yz}^2)}{2}} \quad (4)$$

O estudo da fadiga de certo componente segue uma seqüência lógica que pode ser vista na Figura 4.1. O modelo estrutural consiste da geometria com as propriedades do material. Feita a simulação obtêm o histórico de tensões no ponto de interesse e utilizando o método de contagem de ciclos Rainflow consegue-se um histograma do número de ciclos pela tensão.

Para computar o dano de cada X números de ciclos aplicados pela Y tensão utiliza-se o modelo de dano de Palmgren- Miner e assim estima-se a vida do componente em fadiga.



Figura 4.1- Etapas para a estimativa da vida em fadiga de um componente.

Outra correção necessária decorre do efeito da tensão média dos históricos de tensão. Os resultados dos ensaios de fadiga do material normalmente são obtidos para carregamentos onde a tensão média é zero. Na prática as solicitações não apresentam um valor médio nulo o que diminui a resistência a fadiga da estrutura, principalmente se a tensão média for trativa. Uma das propostas de correção foi apresentada por Goodman. O Critério de Goodman é largamente utilizado e aplicado em situações práticas [16]. A relação de Goodman para correção da tensão média pode ser obtida pela seguinte equação 5 e analisada na Figura 4.2.

$$\frac{S_a}{S_n} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \quad (5)$$

onde S_m é a tensão média, S_a é a amplitude de tensão, S_u é a tensão de ruptura e S_n é a tensão para o cálculo de fadiga.

Os dados utilizados nas simulações foram $E= 2E+6$ MPa, $\nu= 0,3$, $S_u= 400$ MPa e $S_n= 735$ MPa.

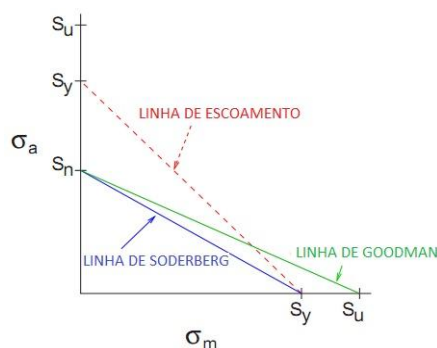


Figura 4.2- Gráfico de tensão média por amplitude de tensão para os critérios de Goodman e Soderberg. [26]

Esse método apresenta bons resultados em virtude dos perfis de tensão ser aleatórios e o dano final ser um somatório linear do dano de cada um. Permite obter a quantidade de ciclos até a falha do componente.

Normalmente um sinal de tensão no tempo é bastante irregular com picos e vales de tamanhos diferentes ao longo do histórico. Obviamente os picos e vales com maior amplitude são os mais danosos, no entanto os picos e vales menores também interferem negativamente no tempo de vida do componente. Para conseguir estimar a vida útil abrangendo todas as am-

plitudes de tensão utiliza-se a equação linear de Palmgren-Miner. Esta teoria deve ser descrita utilizando plotando tensão por número de ciclos em um gráfico. O dano total pode ser definido pela soma dos danos parciais do somatório dos blocos.

O dano acumulado de Palmgren-Miner nada mais é que os somatórios de todos os danos individuais e pode ser calculado conforme a seguinte equação:

$$D_M = \sum_{i=1}^c \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

onde n_i é o número de ciclos em cada nível de tensão aplicado i e N_i é o número de ciclos resistente desse nível de tensão. O dano acumulado de Palmgren-Miner não leva em conta fatores como a ordem de aplicação da carga, nem a velocidade de aplicação, itens que influenciam na vida em fadiga do componente. Porém em históricos de tensão aleatório como o dos pontos críticos do componente em questão, esse parâmetros não podem ser claramente identificados.

O método Rainflow é um método numérico para contagem de ciclos que é muito utilizado constante na norma ASTM E- 1049 de 1994 [27]. Esse método divide um histórico de tensões por tensão média e amplitude de tensões, agrupando os ciclos equivalentes. Radaj[11] comenta que atualmente o Rainflow é o método de contagem de ciclos preferido para análise de fadiga.

O método Rainflow basicamente consiste em analisar o histórico de tensões ou deformações com o eixo do tempo na vertical e de forma figurada a água passa pelo histórico de tensões (deformações) que tem sua amplitude horizontal (por isso o nome Rainflow). Dessa forma ele considera somente os picos externos do sinal como ciclos.

Foi utilizado uma rotina para a contagem do número de ciclos e o dano proveniente de cada ciclo até a falha. Para verificar foi feito um exemplo simples encontrado em Shigley et al[1] e a diferença do modelo calculado e o modelo simulado foi menor que 1% conforme cálculos do anexo 1.

5. CASO DE ESTUDO

5.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O elemento estrutural analisado é um perfil I conforme Figura 5.1 com seção transversal mostrada na mesma figura que pode ser feito com chapas de aço soldadas ou extrudado por inteiro. O modelo numérico global foi feito com elementos de casca de 4 e 3 nós na superfície média de cada chapa, empregando um software comercial (Abaqus, 2009). Esse perfil é largamente utilizado devido ao seu grande momento de inércia de área em relação ao peso, isso faz com que se consiga uma estrutura leve e resistente. Fatores econômicos são também mais uma vantagem já que com o uso de menos material se alcança propriedades geométricas semelhantes. Os raios de dobra dos perfis foram desconsiderados para não aumentar o número de elementos necessários sem com isso alterar significativamente os resultados. O material utilizado foi um SAE 1020 com $E = 2E+6\text{MPa}$, $\nu = 0,3$, $S_u=400\text{Mpa}$ e $S_n=735\text{MPa}$.

O perfil simulado é semelhante ao encontrado em chassis de caminhão ou ônibus, em que carregamentos dinâmicos são evidentes e podem comprometer a estrutura.

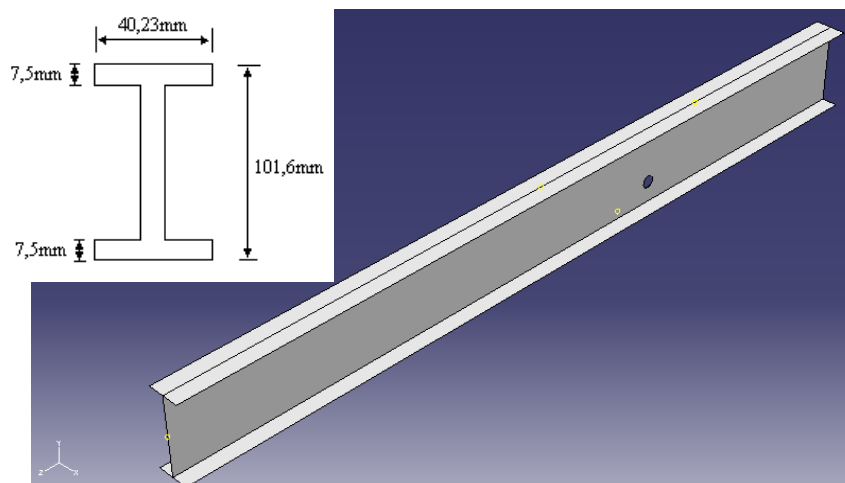


Figura 5.1- Figura demonstrativa da geometria completa da estrutura.

A ligação entre o modelo global e local ocorre através dos pontos de influência ou nós de controle (pontos 1 e 2 da Figura 5.2) [28]. Esses nós estão localizados na fronteira de um ponto de interesse onde será elaborado o modelo local (modelo detalhado). Esses nós de controle serão modelados na mesma coordenada no modelo local mais detalhado no ponto de interesse, neste caso onde se encontra o furo.

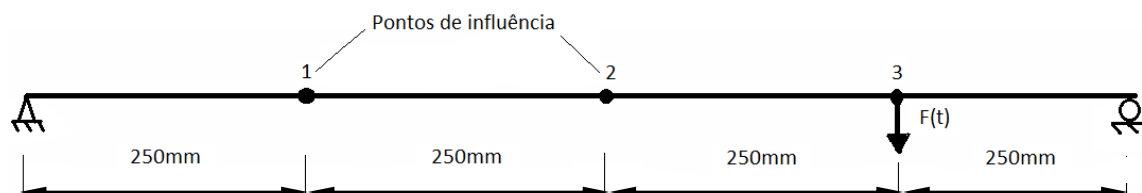


Figura 5.2- Esquema representando os pontos de influência e a local de aplicação do carregamento.

5.2. Carregamentos

Foram utilizados dois carregamentos durante as simulações:

- Carregamento 1: Foi aplicada uma força de 1000N a $\frac{1}{4}$ do extremo da viga (ponto 3 da Figura 5.2) com a intensidade dependente do tempo visto na Figura 5.4 conforme a equação 7.

$$F = 1000 \sum_{i=1}^4 \text{sen}(i * t) \quad (7)$$

- Carregamento 2: Foi aplicada uma força de 10000N a $\frac{1}{4}$ do extremo da viga (ponto 3 da Figura 5.2) com a intensidade dependente do tempo visto na Figura 5.5 conforme a equação 8.

$$F = 10000 \sum_{i=1}^1 (\text{sen}(t) + 2 * \text{sen}(3 * t) + \text{sen}(3.33 * t)) \quad (8)$$

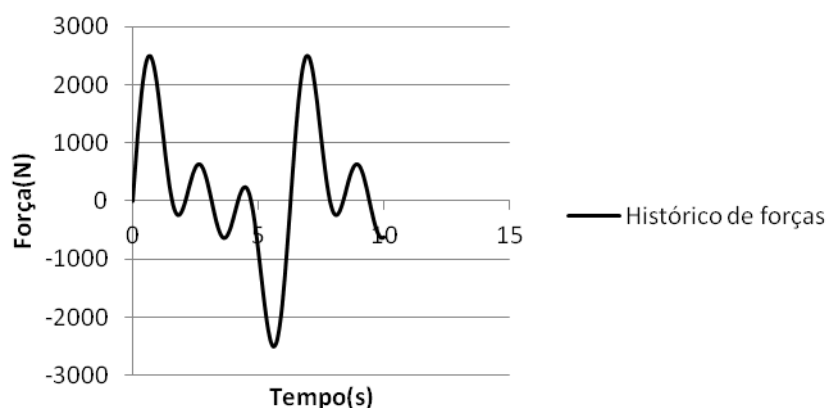


Figura 5.4- Histórico de forças dinâmicas para o carregamento 1.

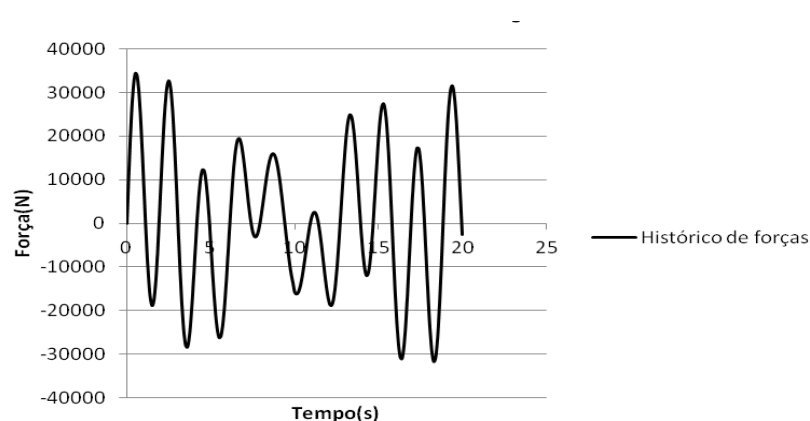


Figura 5.5- Histórico de forças dinâmicas para o carregamento 2.

6. RESULTADOS

6.1. Análise estática linear

A primeira comparação feita foi para verificar a validade das abordagens dispostas para análise. Foram utilizados o modelo analítico de vigas, o modelo de casca, o modelo tridimensional e o modelo de viga. Os resultados de deslocamento e tensão na metade do comprimento da estrutura são mostrados abaixo:

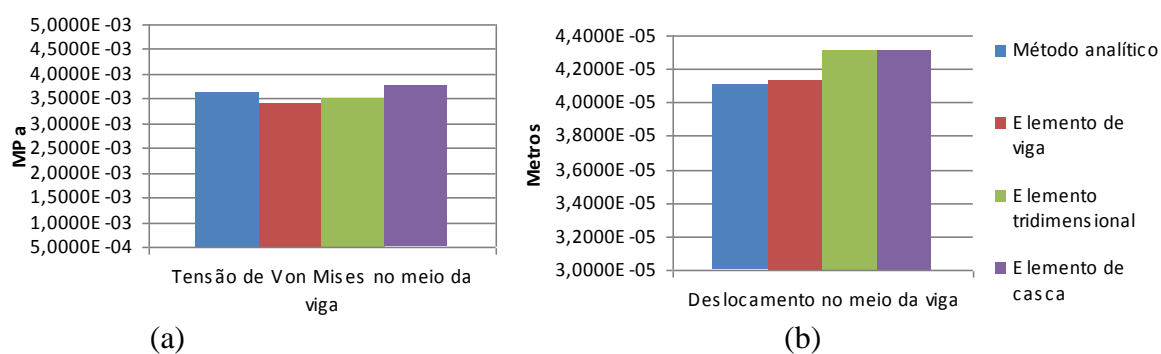


Figura 6.1- Comparação entre o deslocamento e a tensão calculados analiticamente, com elemento de viga, elemento tridimensional e elemento de casca na metade do comprimento da viga.

Após encontrados estes resultados e como os mesmos estavam concordando entre si, o que garante a correta modelagem do problema, partiu-se para uma análise dinâmica do problema e empregar a metodologia Global/local conforme o capítulo a seguir.

6.2) Análise dinâmica linear

A metodologia de análise consistiu em se fazer uma comparação entre os resultados encontrados simulando-se a estrutura inicial pela metodologia Global-local e comparando com a estrutura utilizando elementos de casca pela análise transiente completa. Para o emprego da metodologia Global/local foi necessário gerar uma malha com elementos de viga para obter os deslocamentos no ponto 1 e 2 da geometria (Figura 5.2) a ser analisada como local. O segundo passo foi simular esta seção local e colocar as condições de contorno necessárias para obter uma matriz 6x6, ou seja, primeiro colocou-se um deslocamento unitário em um grau de liberdade e fixaram-se todos os demais e avaliou-se a tensão no ponto de interesse (Ponto A da figura 6.5 e figura 6.2) e assim sucessivamente para os demais graus de liberdade. Obtida a matriz de deslocamentos dos pontos 1 e 2 da Figura 5.2 é necessário multiplicar a matriz de flexibilidade \mathbf{C} pela matriz de deslocamentos \mathbf{B} pela matriz de forças no tempo tendo este resultado comparado com o histórico de tensões obtido pela análise transiente completa. Todos estes cálculos são feitos utilizando as equações 1, 2 e 3. O resultado deste comparativo é mostrado na figura 6.3, mostrando assim uma concordância aceitável entre os mesmos.

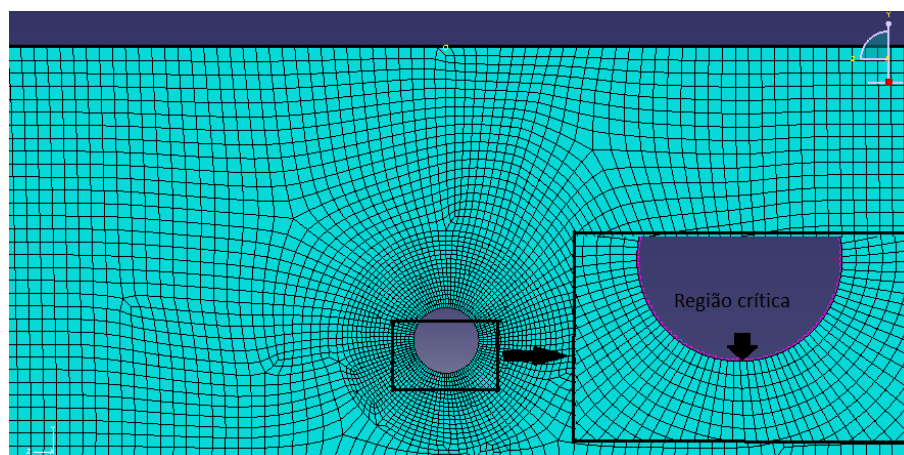


Figura 6.2- Malha de elementos finitos utilizada e indicativo da seta para a região analisada.

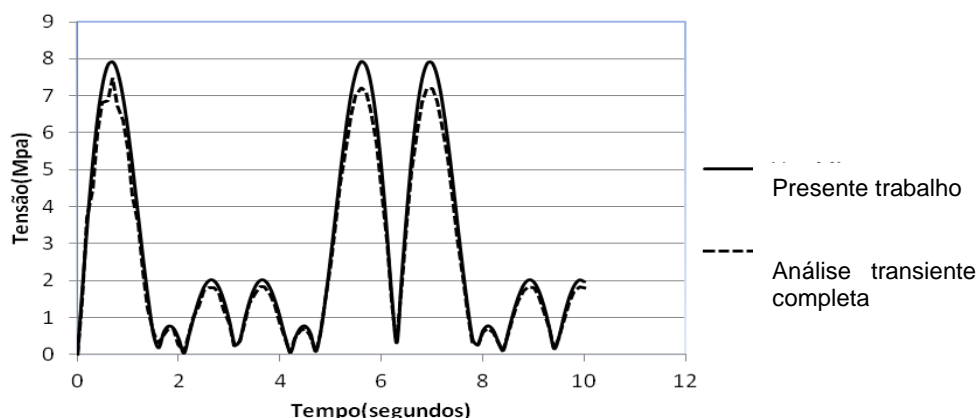


Figura 6.3- Comparação entre a tensão de Von Mises utilizando a metodologia Global/local e o método transiente completo.

O incremento de tempo para o modelo transiente completo para uma primeira análise foi de 0.1s. O tempo de processamento utilizando o método transiente completo foi de aproximadamente 12 minutos enquanto que utilizando a metodologia Global/local o tempo de processamento foi de aproximadamente 2 minutos. Mostrando assim a enorme redução de tempo que este método oferece.

6.3. ESTIMATIVA DA VIDA EM FADIGA

A estimativa de vida em fadiga da estrutura foi dada pela contagem do número de ciclos pelo método Rainflow, o critério de falha para fadiga por Goodman e o dano acumulado por Palmgren-Miner para o carregamento 2. O número de ciclos para a metodologia Global/local (presente trabalho) foi de 15612 ciclos enquanto que para a análise transiente completa foi encontrado 12419 ciclos até a falha. O erro relativo foi de aproximadamente 26% e é considerado alto mesmo com todas as simplificações feitas e ao enorme tempo ganho com esta metodologia. Como este erro foi considerado relativamente alto, resolveu-se analisar um outro ponto da estrutura como forma de investigar mais profundamente as causas do grande erro encontrado. Analisou-se então o ponto B da figura 6.5 que gerou os resultados da figura 6.6. Com os dados desta última figura, foi possível estimar a vida em fadiga para o modelo transiente completo em 68646 ciclos enquanto que a metodologia Global/local (presente trabalho) alcançou um número de 77637 ciclos. Totalizando assim um erro relativo de 13% e o mesmo é quase a metade do erro alcançado no ponto A.

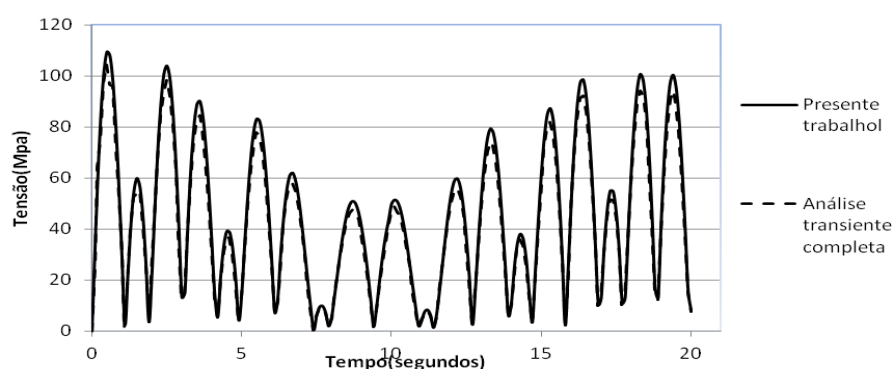


Figura 6.4- Comparação entre a tensão de Von Mises obtida pelo presente trabalho e pela análise transiente completa para o carregamento 2.

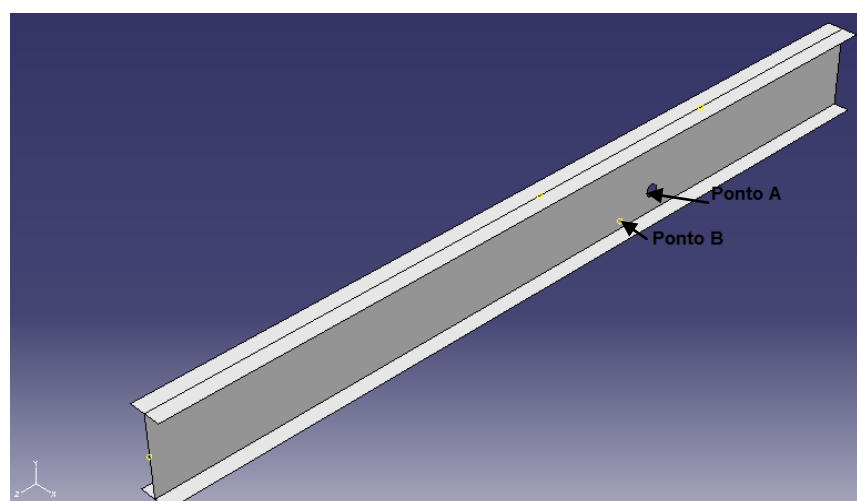


Figura 6.5- Pontos analisados para verificação.

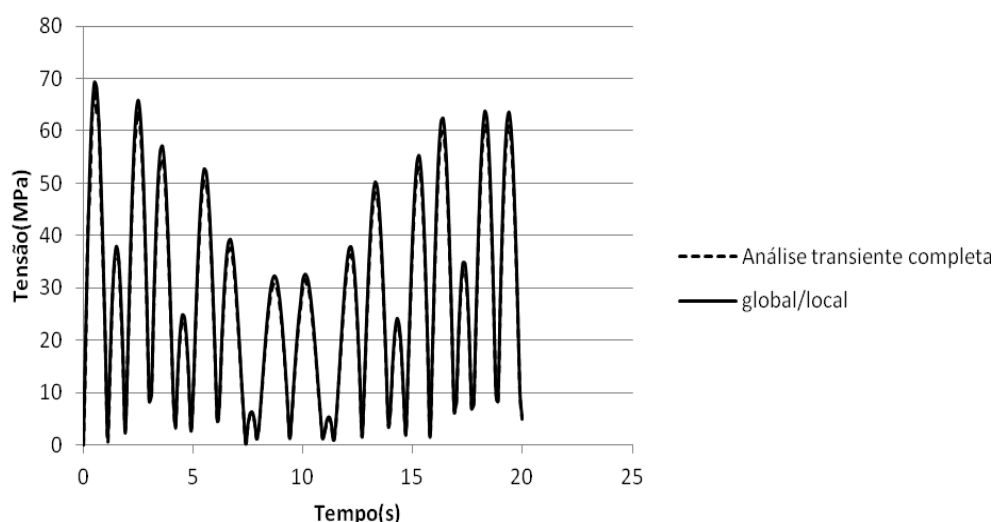


Figura 6.6- Histórico de tensão para o ponto B.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve seu foco na simulação numérica dinâmica de uma estrutura através da metodologia Global/local e uma estimativa da vida da mesma em fadiga. Através das análises estáticas preliminares e dos comparativos feitos com o método clássico de análise, chegou-se a conclusão que a metodologia Global/local conseguiu modelar a estrutura com um bom grau de precisão e com um tempo de processamento muito menor.

A contagem do número de ciclos foi feita utilizando o método do Rainflow, bem como a previsão da vida em fadiga feita pelo método de Palmgren-Miner. Com estes métodos, foi possível estimar a vida em fadiga do componente, dado este muito importante na metodologia moderna de projeto, onde os produtos precisam durar não infinitamente, mas sim até perderem sua utilidade. Obteve-se assim que a metodologia Global/local permite alcançar resultados de durabilidade do componente semelhante ao outro método transiente completo, no entanto o erro alcançado foi relativamente alto para o ponto A. Esse fato pode ser explicado devido à influência do cisalhamento na região do furo e pelo fato dos cortes que dão origem aos pontos de influência estarem muito próximos do furo. Outro fato que talvez tenha aumentado o erro seja o fato de se ter utilizado o modelo de Euler-Bernoulli com polinômios interpolador de terceira ordem para o elemento de viga enquanto que o de Timoschenko iria gerar resultados mais próximos aos obtidos pelo modelo transiente completo por incorporar o efeito do cisalhamento. Outra alternativa seria empregar um modelo global composto por uma malha grosseira de elementos de casca. Portanto, se forem tomados cuidados no sentido de garantir que as condições de contorno trazidas do modelo global se aplicam razoavelmente bem ao modelo local, conclui-se que é possível estimar o dano acumulado na estrutura através da metodologia global/local com razoável precisão.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Takashi Hara e Phillip L. Gould. “**Local-global finite element analysis of reinforced concrete shell structures**” Acessado em 10/10/2011:
<http://www.dist.unina.it/proc/1999/ECCM1/Pdf/279.PDF>

- [2] S. R. Volet N. Chandrat and J. R. Millers “**Global-local analysis of composite structures using methods**” *Computers and Structures*, Vol. 58, N. 3, pp. 453-464, 1996.
- [3] 21. N.F. Knight, Jr., J.B Ransom, O.H. Griffin and D.M. Thompson, 1991, “**Global/local methods research using a common structural analysis framework**”, *Finite Elem.Anal. Design*, Vol. 9, pp. 91-112.
- [4] A.K. Noor , 1986, “**Global-local methodologies and their application to nonlinear analysis**”, *Finite Elements Anal. Design*, Vol. 2, pp. 333–346.
- [5] 39. Woo, K and Whitcomb, J. D., 1993, “**Macro Finite Element using subdomain integration**”, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 9, pp. 937-949.
- [6] Woo, Kyeongsik, Whitcomb, John, 1994, “**Global/local finite element analysis for textile composites**”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, No. 14, pp. 1305-1321.
- [7] Saito, K., Araki, S., Kawakami, T., Moriwaki, I., 1995, “**Global-local finite element analysis of stress intensity factor for a crack along the interface of two phase material**”, *Proceedings of the 1995 10th International Conference on Composite Materials*, Cambridge, UK, Aug 14-18 1995, pp 261.
- [8] Jack A.Collins, 1993. “**Failure of Materials in Mechanical Design, Analysis, Prediction, Prevention**”, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication.
- [9] Ariduru, Seçil, “ **Fatigue life calculation by rainflow cycle counting method**” 2004. *Thesis for degree of master by Middle East Technical University*.
- [10] Whitcomb, John D., Woo, Kyeongsik, 1993. “**Application of Iterative Global/Local Finite Element Analysis**”, *Communications in Numerical Methods in Engineer*, Vol. 9, p. 745- 766.
- [11] Radaj, Dieter, 1990. “**Design and Analisis of Fatigue Resistant Welded Structures**”, Woodhead, Cambridge.
- [12] Branco, C. Moura , et al., 1999. “**Fadiga de Estruturas Soldadas**”, Gulbenkinan, Lisboa.
- [13] Belytschko, T., “**Survey of Numerical Methods and Computer Programs for Dynamic Structural Analysis**,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 37, pp. 23–34, 1976.
- [14] Haftka, Raphael T, 1991. “**Combining Global and Local Approximations**”, *AIAA Journal*, Vol. 29, N. 9, p. 1523-1525.
- [15] Sun, C. T., Mao, K. M., 1991. “**A Refined Global-Local Finite Element Analysis Method**”, *Computer & Structures*, Vol. 40, p. 1027-1031.
- [16] Shigley, J.E; Mishke, C.R.; “**Projeto de Engenharia Mecânica**”, Bookman, 7ª edição, 2005.
- [17] Whitcomb, John D., Woo, Kyeongsik, 1993 . “**Application of Iterative Global/Local**

Finite Element Analysis”, *Communications in Numerical Methods in Engineer*, Vol. 9, p. 745- 766.

[18] Woo, K and Whitcomb, J. D., 1993, “**Macro Finite Element using subdomain integration**”, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 9, pp. 937-949.

[19] Hara, Takashi e Gould, Phillip L. 1999. “**Local-global finite element analysis of reinforced concrete shell structures**” *ECCM99 on CDROM*.

[20] S. R. Volet N. Chandrat and J. R. Millers, 1996. “**Global-local analysis of composite structures using methods**”. *Computers & Structures*, Vol. 58 ,pp. 453-464.

[21] Superelements and global-local analysis. Acessado em 22/08/201: <http://www.colorado.edu/engineering/cas/courses.d/IFEM.d/IFEM.Ch10.d/IFEM.Ch10.pdf>.

[22] Manual do Abaqus 6.9-1 fornecido pela Dassault Systèmes SolidWorks Corp.

[23] Peres, Gustavo. “**Uma metodologia para simulação e análise estrutural de veículos de transporte de carga**”. Dissertação de mestrado. 2006. *Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica UFRGS*.

[24] Haftka, Raphael T, 1991. “**Combining Global and Local Approximations**”, *AIAA Journal*, Vol. 29, N. 9, p. 1523-1525.

[25] Hilber, H. M., T. J. R. Hughes, and R. L. Taylor, “**Collocation, Dissipation and `Overshoot' for Time Integration Schemes in Structural Dynamics**” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 6, pp. 99–117, 1978.

[26] Fatigue guide- Lecture 4- Acessado em 23/09/2011: http://www.acronymchile.com/noteshtml/3rd_Prodn_Design/fat_lecture4/fatigue04_handout.pdf

[27] ASTM E-1049 -1994 “**Rainflow Cycle Counting**” Annual Book of ASTM; Standards, volume 03. Mechanical Testing; pp: 707 – 713.

[28] Slides de aula da disciplina ENG03002- Análise estrutural avançada- “Tópicos especiais” - Acessado em: 28/10/2011: www.mecanica.ufrgs.br/gmap/.

ANEXOS

ANEXO A- VERIFICAÇÃO DO PROGRAMA RAINFLOW.XLS

Dados iniciais:

- Carregamento senoidal variando de 300MPa a -300MPa
- E= 200000MPa
- $\sigma_{mar} = 400\text{MPa}$
- $\sigma_{maf} = \sigma_{mar} + 345 = 745\text{MPa}$

Cálculos conforme o livro do Shigley[16]

$$S_e = 0,506 * \sigma_{mar} = 202.4 \text{ MPa}$$

$$b = -\text{LOG}(\sigma_{mf}/(S_e))/\text{LOG}(2 * 10^6) = -0.0898$$

$$f = \sigma_{mf} * (2 * 10^3)^b / \sigma_{mar} = 0.941$$

$$a = f^2 * \sigma_{mar}^2 / S_e = 700.22 \text{ MPa}$$

$$N = (\sigma_{mar}/a)^{-1/b} = 12568.547 \text{ ciclos}$$

Resultado utilizando o cálculo analítico acima 12568.547 ciclos

Resultado da rotina em Excel utilizada e usando os mesmos dados 12506,7 ciclos.

ANEXO B- COMPARAÇÃO ENTRE ELEMENTO TRIDIMENSIONAL E O DE CASCA.

Foi feita uma comparação utilizando elementos tridimensionais e elementos de casca com o intuito de verificar se o emprego deste último era válido quando comparado ao primeiro, já que este apresenta uma complexidade maior, gera melhores resultados, mas tem um tempo de processamento maior.

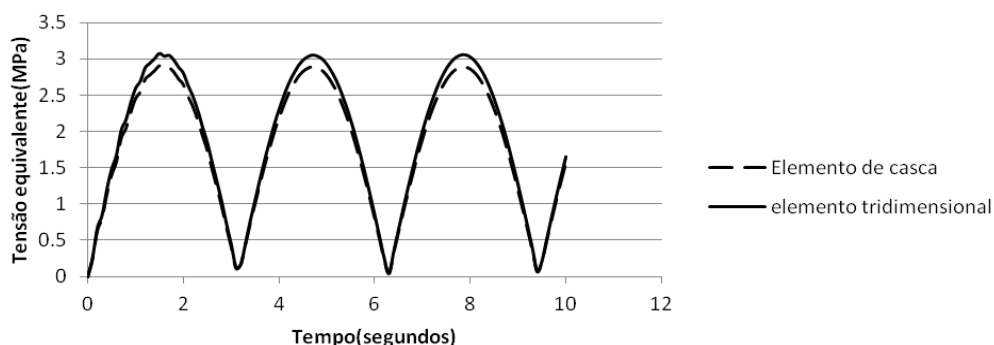


Figura 1- Comparação entre os diferentes elementos propostos inicialmente.

ANEXO C- VALIDAÇÃO DA MALHA

O teste de validação de malha tem por objetivo escolher a melhor malha para a comparação, ou seja, a malha que apresenta resultados muito semelhante com o menor número de elementos possíveis. Isso reduz o tempo de processamento sem com isso alterar consideravelmente a precisão dos resultados. A malha escolhida foi a malha de número 3.

Tabela 1- Comparação numérica das tensões das malhas analisadas.

Malha	Elementos	Tensão
1	8556	2.57529
2	11527	3.46008
3	21478	3.04375
4	43082	3.040122

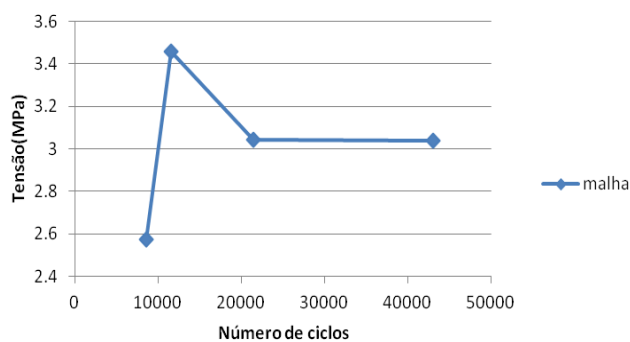


Figura 1- Gráfico mostrando uma comparação entre as malhas analisadas para a validação da malha 3.

Anexo 4- Resultado das demais tensões da análise linear dinâmica

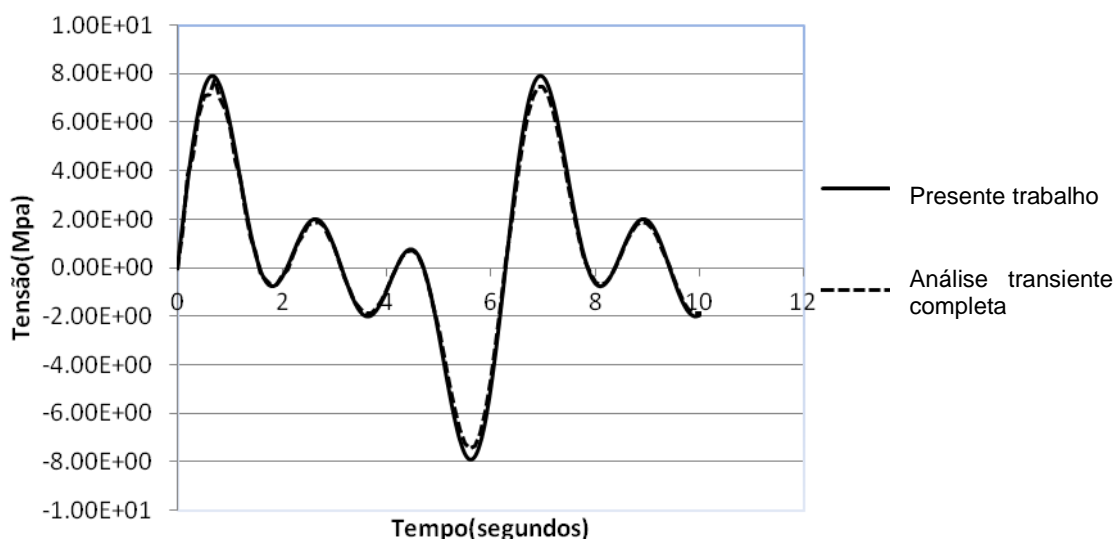


Figura 1- Comparação entre a tensão S11 utilizando a metodologia Global/local e o método clássico de análise.

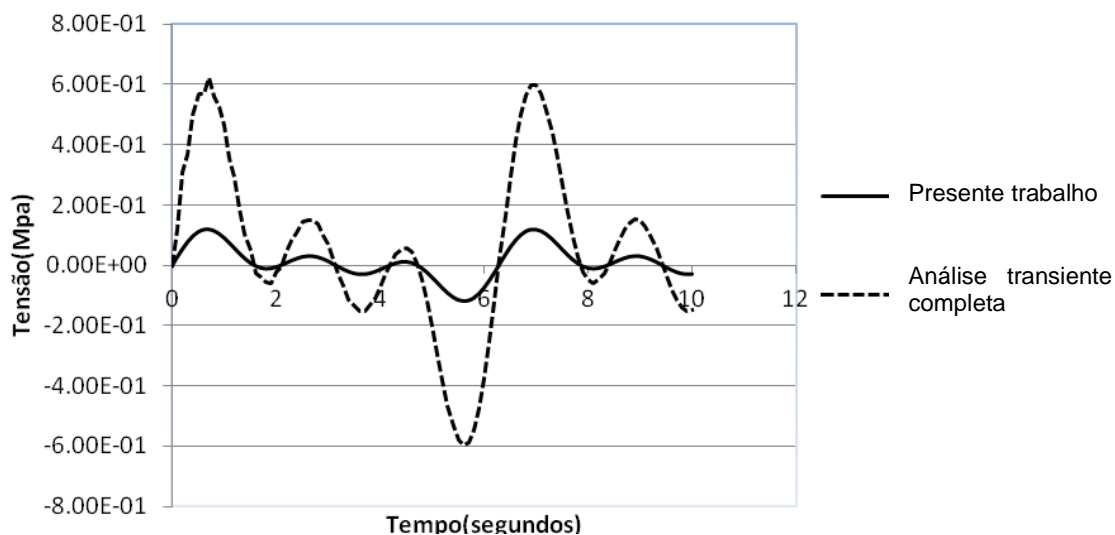


Figura 2- Comparação entre a tensão S22 utilizando a metodologia Global/local e o método clássico de análise.

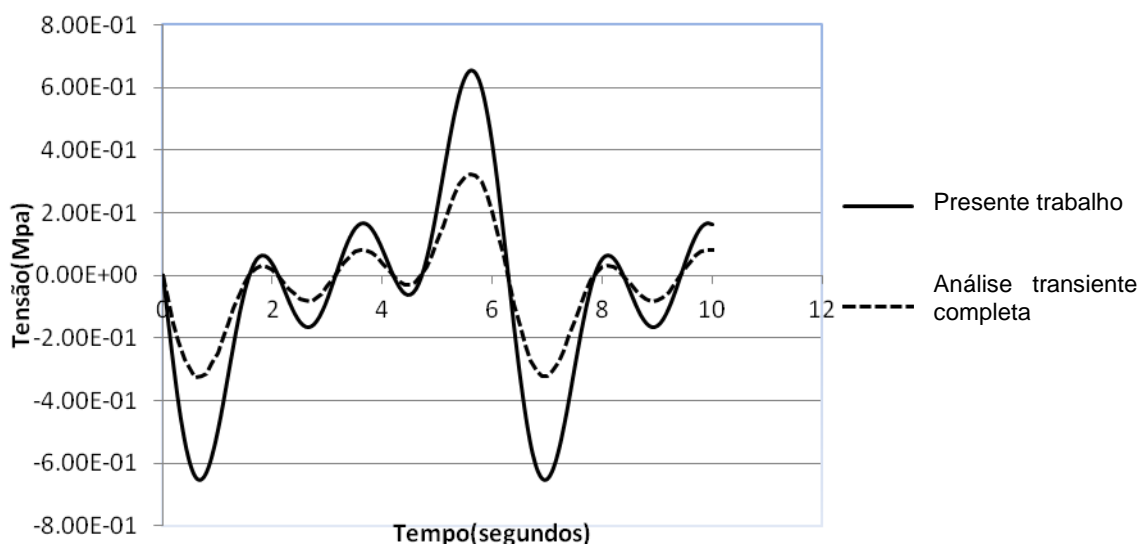


Figura 3- Comparação entre a tensão S12 utilizando a metodologia Global/local e o método clássico de análise.