

## OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS UTILIZANDO MODELOS SUBSTITUTOS SIMPLIFICADOS E ALGORITMOS GENÉTICOS

A. D. Meira Junior<sup>a</sup>, I. Iturrioz<sup>b</sup>

<sup>a</sup>UPF-FEAR- Universidade de Passo Fundo – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Curso de Engenharia Mecânica, Cx Postal 611, [agenor@upf.br](mailto:agenor@upf.br), <http://www.upf.br>

<sup>b</sup>UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC, Rua Sarmento Leite, 425 CEP 99050-970 – Porto Alegre – RS – Brasil, [ignacio@mecanica.ufrgs.br](mailto:ignacio@mecanica.ufrgs.br), <http://www.mecanica.ufrgs.br/promec>

**Palavras chave:** impacto, estruturas reticuladas, Método dos Elementos Finitos, otimização, algoritmos genéticos.

**Resumo.** O comportamento de veículos terrestres submetidos ao impacto é de grande relevância na engenharia automobilística. Para otimização de estruturas sob impacto, é exigida a possibilidade de criar modelos que sem perder os aspectos essenciais do problema permitam obter soluções em tempo computacional reduzido, como os formados por barras que levem em conta as possíveis formas de colapso. Neste contexto se pretende desenvolver uma metodologia para utilização de um modelo simplificado da estrutura real formado por barras flexíveis e/ou rígidas unidas através de juntas esféricas e translacionais não lineares que permita a otimização da estrutura que representa em um tempo computacional reduzido utilizando como ferramenta de otimização algoritmos genéticos disponíveis em softwares comerciais, sem aprofundar-se no tema otimização. O ajuste da rigidez não linear das juntas esféricas e translacionais que simulam o comportamento dos elementos estruturais é obtido a partir da análise de modelos em elementos finitos de casca que capturam o comportamento de estruturas tubulares de parede fina quando impactadas. Posteriormente são apresentados exemplos desta metodologia aplicada para otimização de estruturas. Finalmente avalia-se o desempenho dos modelos simplificados implementados na otimização estrutural.

## 1 INTRODUÇÃO

A palavra *Crashworthiness*, significa a habilidade de uma estrutura absorver a energia de impacto para proteger os ocupantes durante um choque, é naturalmente um dos mais importantes critérios de projeto para a estrutura de veículos de passageiros. Entretanto, um projeto estrutural que leve em conta o *crashworthiness* é uma tarefa difícil para o qual o processo de projeto envolve decisões não óbvias uma vez que a estrutura tem que ser rígida o suficiente em algumas regiões para prevenir o colapso do compartimento dos passageiros e ainda permitir grandes deformações sem romper em outras regiões para poder absorver a energia durante o impacto.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para otimização de estruturas representadas por modelos simplificados formados por tubos flexíveis conectados através de juntas não lineares que levam em conta a interação entre solicitações de flexão e normal como descrito em detalhe em Meira, Walber & Iturrioz (2006).

Os elevados tempos de processamento dos modelos tradicionais de MEF na simulação de processos de “*crash*” dificultam a utilização prática desta metodologia em trabalhos de otimização bem como nos estágios iniciais de projeto. Uma alternativa eficiente para contornar semelhante problema consiste na utilização de modelos simplificados como os que aqui serão apresentados.

## 2 DESCRIÇÃO DA FORMA DE COLAPSO DE TUBOS

Elementos estruturais podem responder de modo estável ou instável quando sujeitos a uma carga dinâmica. Um fenômeno que pode ocorrer é a flambagem dinâmica progressiva, como mostrado na Figura 1(b). Segundo Jones (2001), um cilindro de parede fina ou tubo, quando sujeito a uma carga estática, como mostrado na Figura 1(c), pode ter uma curva de força axial versus deslocamento característica similar à mostrada na Figura 1(a). O tubo exibe um comportamento instável depois de ter atingido a carga de pico no ponto A. Muitos projetos estruturais são baseados numa carga igual a este pico dividido por um fator de segurança. A magnitude deste fator de segurança é selecionada levando em conta a inclinação AB do comportamento da curva carga-deslocamento (características de pós-flambagem). Entretanto, tubos cilíndricos de parede fina são usados em muitas aplicações práticas para absorver energia de impacto. Nestas aplicações, muitas vezes o deslocamento axial total do tubo pode exceder consideravelmente o deslocamento associado com a carga correspondente ao ponto B da Figura 1(a). Assim, uma forma diferente deve ser empregada para avaliar a flambagem plástica de estruturas.

É evidente a partir da Figura 1(a) que o comportamento força-deslocamento exibido representa um padrão. Cada par de picos na Figura 1(a) é associado com o desenvolvimento de uma dobra ou flambagem local. As fotografias a partir da esquerda para a direita referem-se aos números 1 a 9 da Figura 1(a). Usualmente, estas dobras se desenvolvem seqüencialmente a partir de uma extremidade do tubo de tal forma que o fenômeno é conhecido como flambagem progressiva. O modo mais eficiente de utilização do material do tubo acontece quando ocorre o maior amassamento possível, como indicado na Figura 2 para um tubo de parede fina com seção transversal quadrada. Por conveniência, projetistas frequentemente ignoram as flutuações da curva força-deslocamento e utilizam o valor médio ( $P_m$ ), como indicado na Figura 1(a). Um dispositivo ideal de absorção de energia é definido, para alguma finalidade, como aquele que tem uma resistência constante e, portanto, oferece uma desaceleração constante durante o evento de impacto.

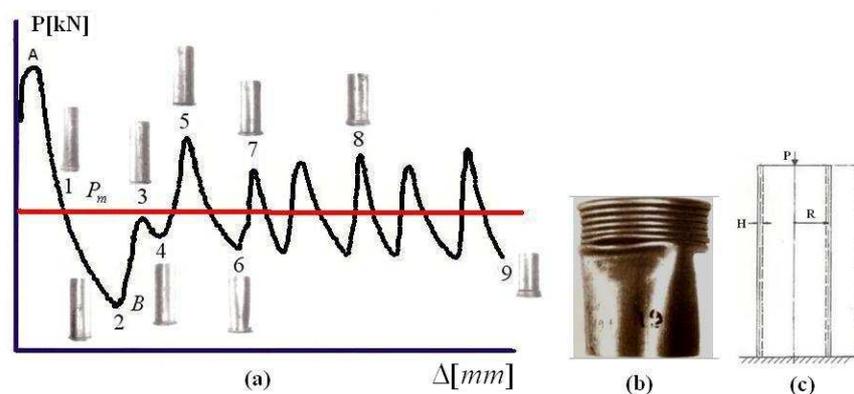


Figura 1: Comportamento estático e dobras.

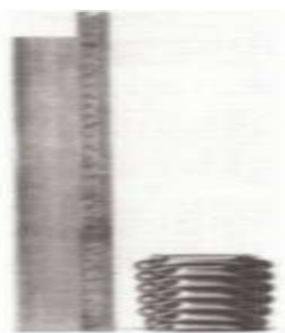


Figura 2: Tubo de parede fina de aço doce com seção quadrada (amassamento estático). Fonte: Jones (2001).

### 3 SISTEMAS MULTICORPO

Ambrósio (2001) descreve o comportamento de sistemas multicorpo. Um sistema multicorpo é uma coleção de corpos rígidos ou flexíveis conectados por juntas cinemáticas (juntas esféricas, juntas translacionais, molas) como mostrado na Figura 3. Estes sistemas são complexos arranjos de subsistemas mecânicos e estruturais com diferentes propósitos de projeto e comportamento mecânico. Estruturas podem comportar-se como sistemas multicorpo devido a grandes rotações ou porque desenvolvem mecanismos de deformação definidos, como em aplicações de *crashworthiness*. Baseado em dinâmica de corpos rígidos um sistema de deformações podem ser descrito utilizando modelos de deformações substitutos como, por exemplo, elementos de mola-amortecedor. Para atender estes objetivos têm sido utilizados sistemas multicorpos, combinando vigas com juntas cinemáticas. A principal vantagem desta forma de proceder está no pequeno número de parâmetros requeridos para descrever o comportamento estrutural.

A presença de juntas cinemáticas restringe o movimento relativo entre corpos adjacentes reduzindo o número de graus de liberdade do sistema. Por exemplo, o número de graus de liberdade relativos entre dois corpos conectados por juntas esféricas é três. Para juntas de revolução o número de graus de liberdade relativos é um.

A metodologia proposta por Ambrósio (2001) se propõe a montar elementos rígidos unidos através de juntas do tipo apresentado na Figura 4.

As características do sistema mola-amortecedor que descreve as propriedades das juntas não lineares são obtidas por meio de testes experimentais dos componentes, análise de simulações feitas com o método dos elementos finitos considerando não linearidade física e

geométrica ou métodos analíticos simplificados. Por exemplo, para uma rótula plástica de flexão a rigidez da mola é expressa como uma função da mudança do ângulo relativo entre dois corpos adjacentes conectados pela rótula plástica, como mostrado na Figura 5.

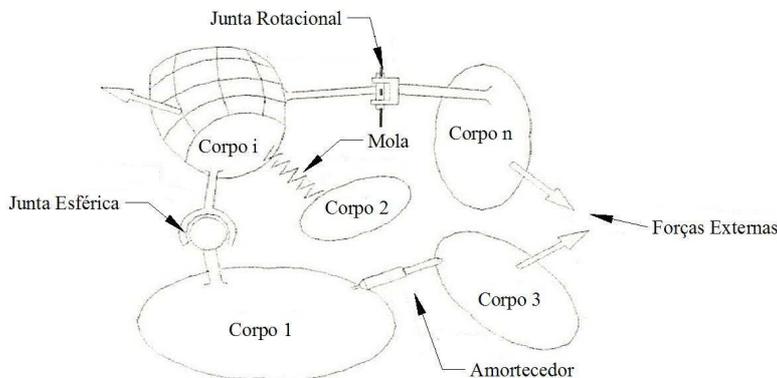


Figura 3: Sistema multicorpo. Fonte: (Ambrósio, 2001).

O relacionamento típico constitutivo torque-ângulo mostrado na Figura 5 é encontrado baseado no modelo de amassamento cinemático para o caso de uma seção transversal tubular. Este modelo pode ser modificado levando em conta as propriedades elástico-plásticas dos materiais incluindo encruamento por deformação e sensibilidade à razão de deformação para alguns materiais.

Na seção 5 se apresentam metodologias para o levantamento de curvas que permitiram alimentar o comportamento das juntas de sistemas multicorpo.

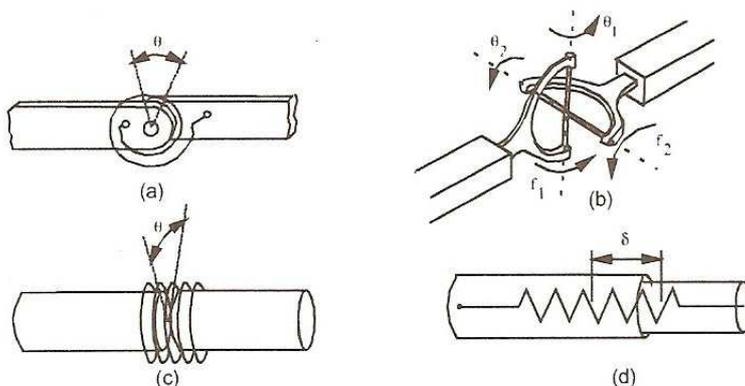


Figura 4: Rótulas plásticas: a) flexão; b) flexão com dois eixos; c) Torção; d) Axial. Fonte: Ambrósio (2001).

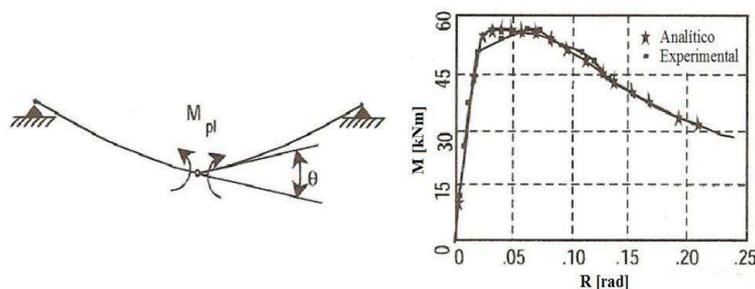


Figura 5: Momento de flexão da rótula plástica e sua relação constitutiva. Fonte: Ambrósio (2001).

## 4 ALGORITMOS GENÉTICOS

A técnica de otimização utilizada neste trabalho é Algoritmos Genéticos. Este método é baseado num processo de seleção natural. Existe extensa bibliografia sobre esta metodologia e suas aplicações e entre elas um clássico é o livro de Goldberg (1989). Este método modifica a população de soluções individuais em forma sucessiva. Para cada passo, o algoritmo genético seleciona indivíduos de forma aleatória a partir da população corrente para serem “pais” e usam-nos para produzirem “filhos” para a próxima geração. Criando sucessivas gerações, a população “evolui” para uma solução ótima. Algoritmos genéticos podem ser utilizados para problema de otimização para os quais a função objetivo é descontínua, não diferenciável, estocástica ou altamente não linear. Um algoritmo genético utiliza três tipos principais de regras em cada passo para criar a próxima geração a partir da população corrente:

- Regras de seleção para escolha de indivíduos chamados de “pais”, que contribuem para a população da próxima geração.
- Regras para cruzamento para combinar dois “pais” para formar um “filho” que constituirá a próxima geração.
- Regras de mutação aplicadas de forma aleatória para alterar o indivíduo “pai” para formar um “filho”.

O algoritmo genético gera uma população de valores para cada interação. O melhor valor dentro da população aproxima a solução ótima.

A terminologia utilizada neste trabalho é a empregada na *toolbox* de Algoritmos Genéticos do software MatLab (MathWorks, 2004). Tais termos são:

- Função objetivo: é a função que se deseja otimizar.
- Indivíduo: é qualquer ponto para o qual se aplica a função objetivo. Um indivíduo é algumas vezes referenciado como “genoma” e o vetor de entrada do indivíduo é referenciado como “gen”.
- População e geração. A população é um arranjo de indivíduos. Para cada interação, o algoritmo genético realiza uma série de cálculos sobre a população corrente e produz uma nova população. Cada sucessiva população é chamada de “nova geração”.
- Diversidade: refere-se a distancia média entre indivíduos dentro da população. Uma população tem alta diversidade se a distância média é grande; em caso contrário tem uma baixa diversidade. A diversidade é essencial para o algoritmo genético porque ela possibilita o algoritmo a pesquisar uma grande região do espaço.
- “Pais” e “filhos”: para criar a próxima geração, o algoritmo genético seleciona certos indivíduos na população corrente, chamados “pais”, e utiliza-os para criar indivíduos para a próxima geração, chamados “filhos”. Tipicamente, o algoritmo seleciona “pais” que tenham os melhores valores da função objetivo.

## 5 METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DE CURVAS

A interação entre a flexão e o esforço normal é de grande importância no estudo de estruturas automotivas uma vez que no estudo de *crashworthiness* a maioria dos elementos que formam as estruturas estão sujeitos a uma combinação de carregamento de compressão e flexão simultânea.

Kim & Wierzbicki (2001) apresenta uma metodologia para caracterizar esta interação. Eles estudam o comportamento de colunas prismáticas com seção transversal quadrada com relação de aspecto ( $b/t$ ) ( $80/1.6=50$  e  $80/2.4=33.33$ ) onde  $b$  é a largura da seção e  $t$  sua espessura. A Figura 6 apresenta a configuração do modelo citado.

A extremidade inferior é engastada e a extremidade superior é submetida a uma velocidade de deslocamento  $v$  e uma velocidade angular  $w$  prescrita. Diferentes relações de  $v/w$  são aplicadas o que implica em submeter à estrutura a diferentes combinações de esforço normal e momento fletor.

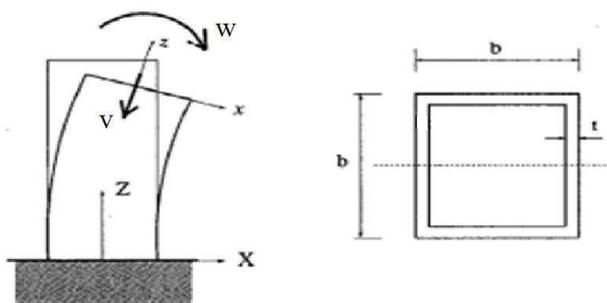


Figura 6: Configuração do modelo. Kim & Wierzbicki (2001).

Dois sistemas de coordenadas são utilizados neste modelo como é mostrado na Figura 6. O primeiro é o sistema de coordenadas global  $(X, Y, Z)$  tendo sua origem no centro da extremidade inferior do engaste da viga indeformada e o segundo é o sistema de coordenadas local  $(x, y, z)$  vinculado ao centro da seção transversal do extremo superior da viga. O sistema de coordenadas locais acompanha a configuração deformada da seção transversal da extremidade superior. Kim & Wierzbicki (2001) definem um parâmetro  $\eta$  que determina a contribuição relativa da compressão e da flexão.

$$\eta = (3bw)/(8v) \quad (1)$$

Os valores de  $\eta$  podem variar de 0 a infinito, em função disto resulta conveniente considerar  $\eta = \tan(\varphi)$ , sendo que  $\varphi$  varia de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . O caso quando  $\eta = 0$  ( $\varphi = 0^\circ$ ) é simplesmente uma compressão pura, enquanto  $\eta = \infty$  ( $\varphi = 90^\circ$ ) corresponde a flexão pura.

Utilizando MEF foram levantadas curvas de forças versus deslocamento e momentos versus rotação para tubos sob esforço combinado de flexão e compressão para desta forma alimentar as conexões do modelo simplificado. São avaliados tubos de seção  $40 \times 40 \times 1.0$  mm,  $40 \times 40 \times 1.2$  mm,  $50 \times 50 \times 1.0$  mm,  $50 \times 50 \times 1.5$  mm,  $60 \times 60 \times 1.5$  mm,  $60 \times 60 \times 2.0$  mm,  $70 \times 70 \times 1.5$  mm,  $70 \times 70 \times 2.0$  mm,  $80 \times 80 \times 1.75$  mm e  $80 \times 80 \times 2.4$  mm, o que corresponde a faixa  $30 \leq b/t \leq 46.67$ . O comprimento adotado para os tubos é igual a duas vezes a largura da seção transversal. São avaliados o comportamento dos tubos para ângulos  $\varphi = 0^\circ$  até  $\varphi = 90^\circ$  com variação de  $5^\circ$ .

São realizadas simulações numéricas para os tubos feitos de aço de baixo carbono com módulo de elasticidade longitudinal  $E = 2.07 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>, tensão de escoamento inicial  $\sigma_y = 240$  N/mm<sup>2</sup>, material elasto-plástico perfeito, considerando o coeficiente de Poisson  $\nu = 0.3$ . A largura de cada tubo é composta por elementos com tamanho  $5 \times 5$  mm. Foi utilizado o elemento de casca de 4 nós co-rotacional Hughes-Liu (LS-Dyna, 1999) utilizando 2 pontos de integração. Para aplicar as velocidades prescritas se consideram todos os nós da extremidade superior vinculados a um corpo rígido para assim deixar as condições mais próximas possíveis às que ocorreriam no caso de um elemento de viga submetido a esforço normal e momento fletor aplicados simultaneamente. Na Figura 7 se apresentam as configurações deformadas obtidas com o modelo de elementos finitos de casca para diferentes valores de parâmetros medidos em termos do ângulo  $\varphi$  o que implica em diferentes relações entre o esforço normal  $N$  e o momento fletor  $M$ .

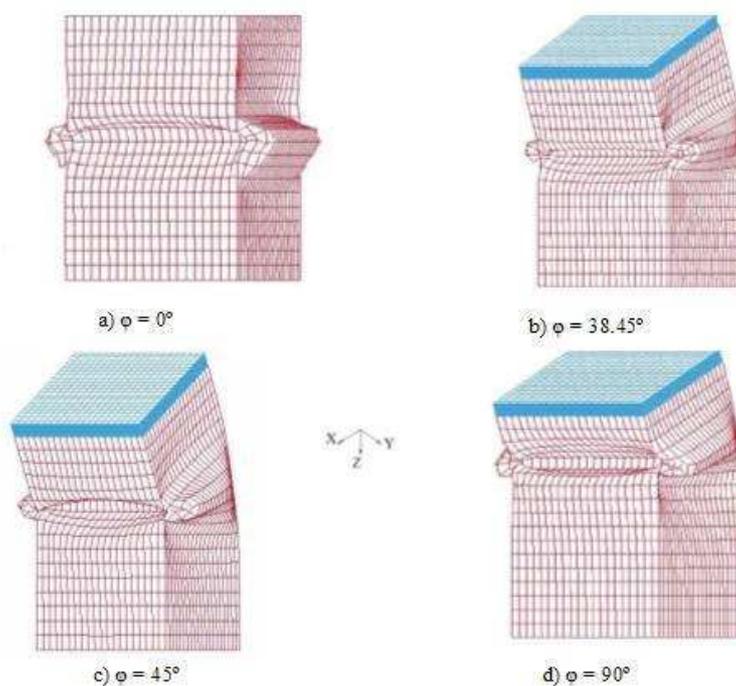


Figura 7: Deformadas.

As Figuras 8 e 9 mostram a evolução da força versus deslocamento e do momento fletor versus rotação na seção onde se forma a rótula plástica. A força e o momento são tomados a partir das reações no corpo rígido vinculado com a seção superior que são os mesmos verificados na seção mais deformada (rótula plástica).

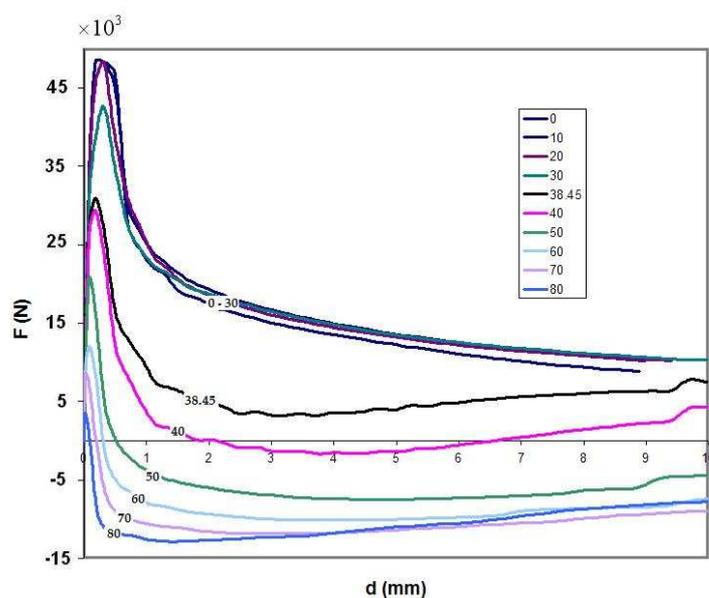


Figura 8: Curvas Força versus Deslocamento Tubo 50x50x1.0mm.

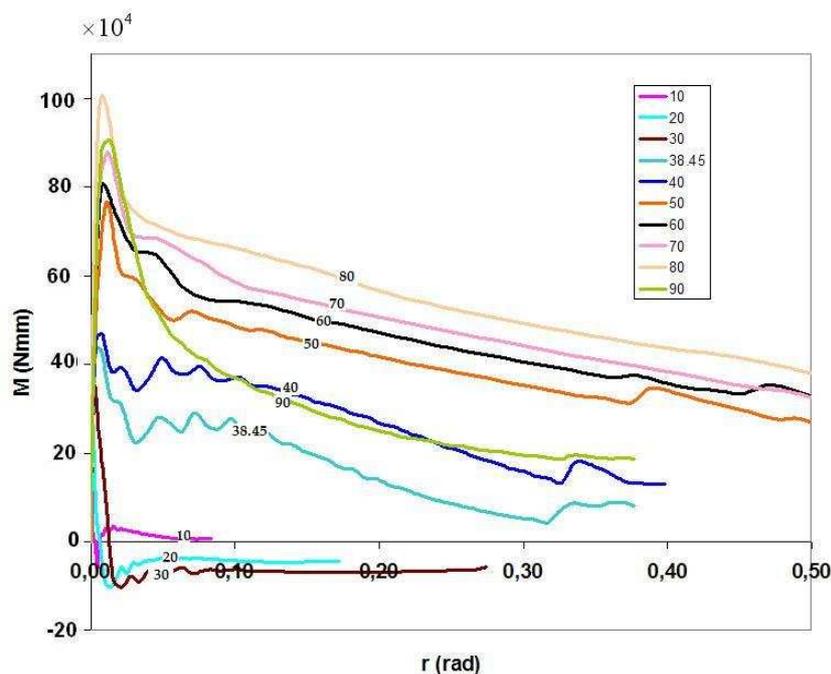


Figura 9: Curvas Momento x Rotação Tubo 50x50x1.0mm.

## 6 DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS

Nesta seção se apresenta primeiramente a metodologia proposta para representar estruturas submetidas a forças de impacto utilizando modelos substitutos simplificados. A estrutura é representada por barras flexíveis unidas através de conexões não lineares (unidas por barras rígidas) governadas por curvas características.

A utilização de um modelo de barras e a discretização nas regiões das juntas com MEF (com outro tipo de elemento) poderia ser feita, no entanto isto tornaria o problema com um excessivo número de graus de liberdade, com um tempo computacional elevado. Como o problema tem que ser rodado inúmeras vezes (característica dos métodos utilizados nos algoritmos de otimização) isto não é uma boa alternativa.

As barras do modelo simplificado devem sofrer deformação. Para isto as barras de união com as barras rígidas que representam as juntas rotacionais e translacionais (representadas por elementos de viga de elementos finitos) são de material elástico ou elasto-plástico. Desta forma, as deformações destas barras são levadas em conta no evento de impacto. O modelo simplificado, desta forma, é constituído por todas as barras da estrutura e não somente pelas juntas translacionais e rotacionais. As barras de material elástico ou elasto-plástico representadas por elementos de viga fazem parte do modelo simplificado juntamente com as juntas rotacionais e translacionais e as barras rígidas.

### 6.1 Simulação de juntas translacionais

Neste trabalho modelos simplificados substitutos da estrutura real são montados com elementos rígidos e/ou elásticos/elastoplásticos unidos através de juntas esféricas e translacionais formando um modelo simplificado de barras da estrutura que se deseja analisar, utilizando o procedimento computacional apresentado por Dias de Meira, Walber & Iturrioz (2006).

As juntas translacionais utilizadas são as apresentadas na Figura 10, disponíveis na no

sistema Ls-Dyna (1999) através dos comandos “constrained\_joint\_cylindrical” e “constrained\_joint\_stiffness\_translational”.

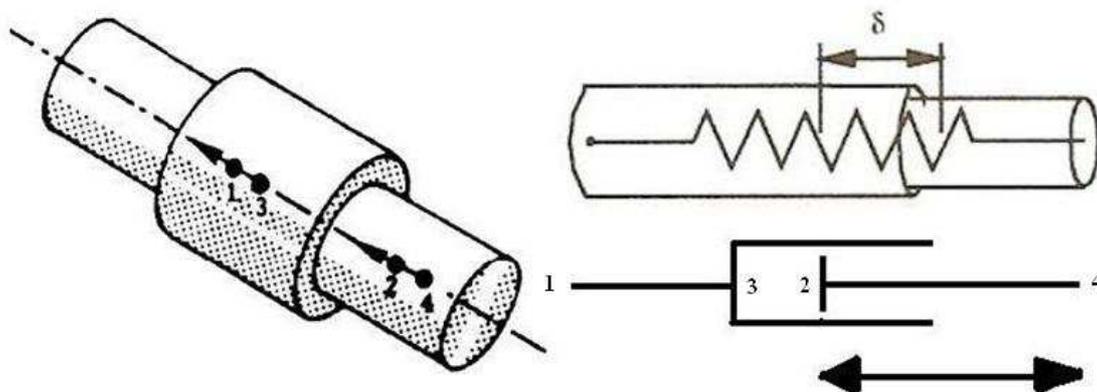


Figura 10: Junta translacional. Fonte: Ls-Dyna (1999).

Um exemplo de como são utilizadas as juntas translacionais é apresentado na Figura 11. Utilizando elementos de vigas do tipo Hughes-Liu (LS-Dyna, 1999), a viga é dividida em quatro elementos. O elemento de número 1 impacta contra a parede e é feito de material elástico. Os elementos número 2 e 3 são feitos de material rígido e o número 4 é feito de material elástico. Os elementos 2 e 3 representam a junta translacional, podendo um elemento passar sobre o outro de forma semelhante ao que acontece num elemento do tipo amortecedor, como mostrado na Figura 10. A parede rígida avança contra o tubo com uma velocidade  $V$ .

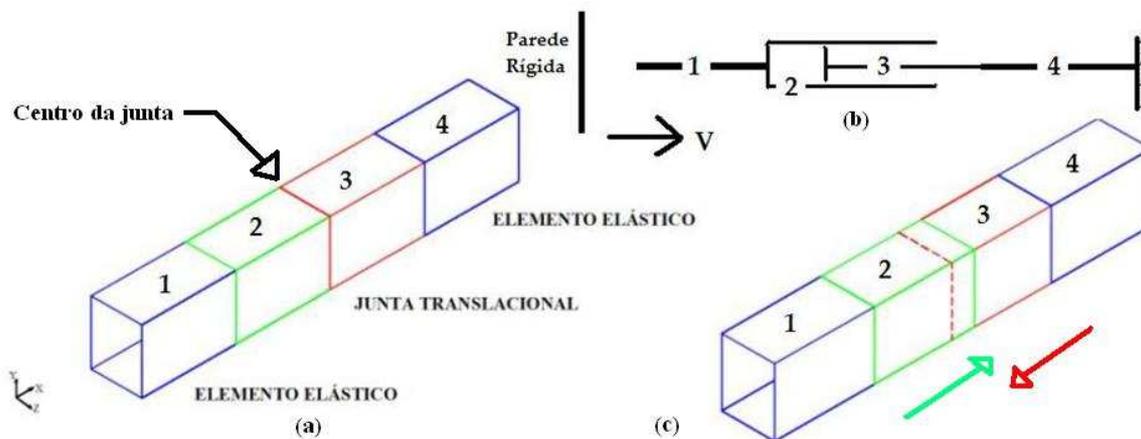


Figura 11: Junta translacional (a) Estrutura indeformada; (b) Esquema; (c) Estrutura deformada.

A junta translacional tem sua relação constitutiva fornecida através de uma curva Força versus Deslocamento não linear como a mostrada na Figura 12 (curva MEF). Na Figura 12 se apresenta a resposta obtida ao impactar uma parede rígida contra um modelo em elementos finitos de casca que representa um tubo de parede fina (ver Figura 11), e a resposta da junta translacional aqui apresentada (ver Figura 12 curva simplificado).

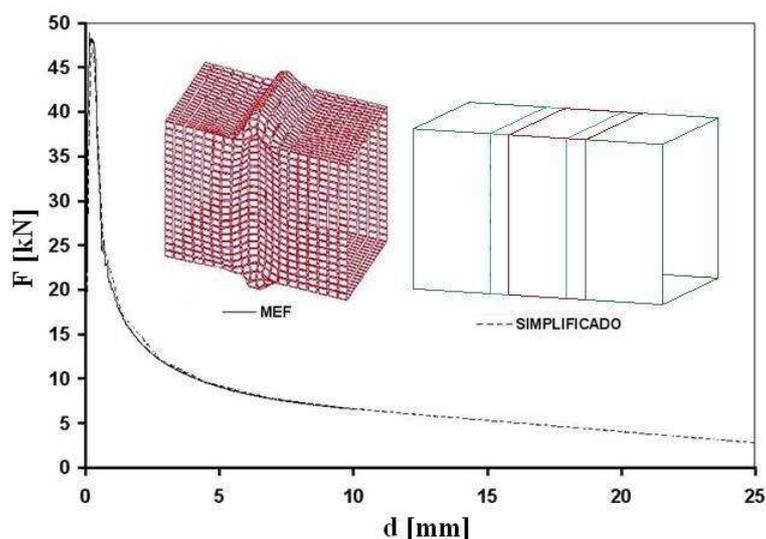


Figura 12: Comparação da relação Força axial aplicada  $F$  vs deslocamento axial  $d$ , entre a curva fornecida como característica de rigidez da junta obtida por MEF e a gerada como resposta pelo modelo simplificado.

## 6.2 Simulação de juntas rotacionais

As juntas rotacionais utilizadas são apresentadas na Figura 13 (d), disponível na livreria de elementos do sistema software Ls-Dyna (1999) através dos comandos “constrained\_joint\_espherical” e “constrained\_joint\_stiffness\_translational”.

A Figura 13 representa o modelo simplificado de uma viga que impacta contra um obstáculo rígido na sua parte central, de forma a sofrer flexão pura, e apresenta a metodologia de utilização das juntas rotacionais. A discretização é realizada utilizando elementos de vigas do tipo Hughes-Liu (LS-Dyna, 1999), material rígido, indicados com números 1 e 3 na Figura 13 (b). A junta rotacional, indicada com o número 2 na Figura 13 (b). Na Figura 13 (a) é apresentada uma vista frontal do tubo e do obstáculo (bloco rígido fixo) contra o qual a viga impacta com velocidade  $V$ . A Figura 13 (c) apresenta a deformada, podendo ser visualizada a rotação sofrida pela viga.

A junta rotacional tem sua relação constitutiva fornecida através de uma curva Momento versus Rotação da junta como a mostrada na Figura 14 (curva MEF).

Na Figura 14 se apresenta a resposta obtida ao impactar um modelo de elementos finitos que representa um tubo retangular de parede fina sobre um obstáculo rígido que induz uma flexão e a resposta do modelo simplificado empregando a junta rotacional como apresentado na Figura 13. As duas curvas da Figura 14 são praticamente coincidentes.

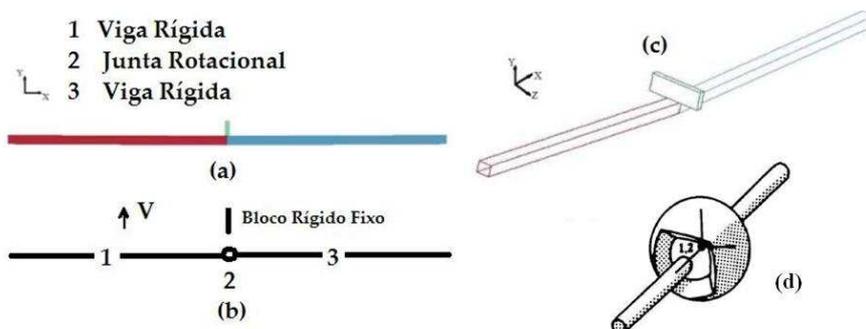


Figura 13: Viga impactando contra obstáculo (a) Vista frontal; (b) Esquema; (c) Deformada; (d) Junta esférica.

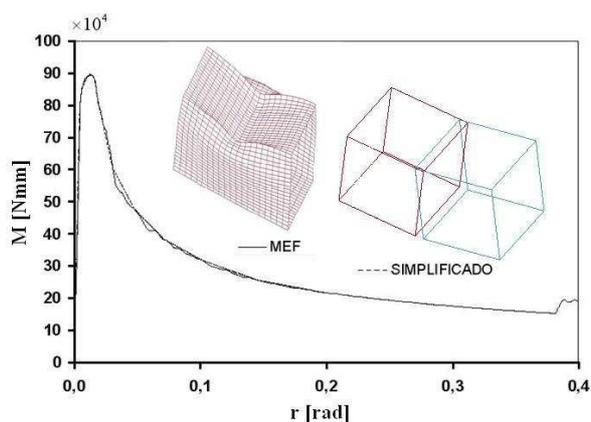


Figura 14: Comparação da relação Momento aplicado  $M$  vs rotação  $r$ , entre a curva fornecida como característica de rigidez da junta obtida por MEF e a gerada como resposta pelo modelo simplificado.

### 6.3 Simulação de juntas translacionais e rotacionais em interação – compressão e flexão

Para simular a interação entre os esforços de compressão e flexão reproduziremos o problema da Figura 6 utilizando para tal um tubo de seção quadrada com largura  $b = 60$  mm e  $t = 2$  mm conforme apresentado na Figura 15. Os tubos são feitos de aço de baixo carbono com módulo de elasticidade longitudinal  $E = 2.07 \cdot 10^5$  N/mm<sup>2</sup>, tensão de escoamento inicial  $\sigma_y = 240$  N/mm<sup>2</sup>, material elasto-plástico perfeito, com coeficiente de Poisson  $\nu = 0.3$ . A largura de cada tubo é composta por elementos com tamanho  $5 \times 5$  mm. Foi utilizado o elemento de casca de 4 nós co-rotacional Hughes-Liu (LS-Dyna, 1999) utilizando 2 pontos de integração. Para aplicar as velocidades prescritas se consideram todos os nós da extremidade superior vinculados a um corpo rígido para assim deixar as condições mais próximas possíveis às que ocorreriam no caso de um elemento de viga submetido a esforço normal e momento fletor aplicados simultaneamente tal qual já apresentado na seção 5. A Figura 15(b) apresenta o modelo simplificado que é composto por cinco elementos de viga, dois elementos elásticos (E) e três elementos rígidos (R). O ângulo  $\varphi = 30^\circ$ ,  $v = 1000$  mm/s e  $w = 25.66$  rad/s são utilizados. O valor de  $w$  é obtido através da equação (1).

As Figuras 16 e 17 apresentam uma superposição das curvas obtidas por MEF e fornecidas como dados de entrada como características de rigidez das juntas translacionais e rotacionais com as curvas obtidas como resposta no modelo simplificado como reação no corpo rígido que está vinculada à parte superior do tubo (prisma azul).

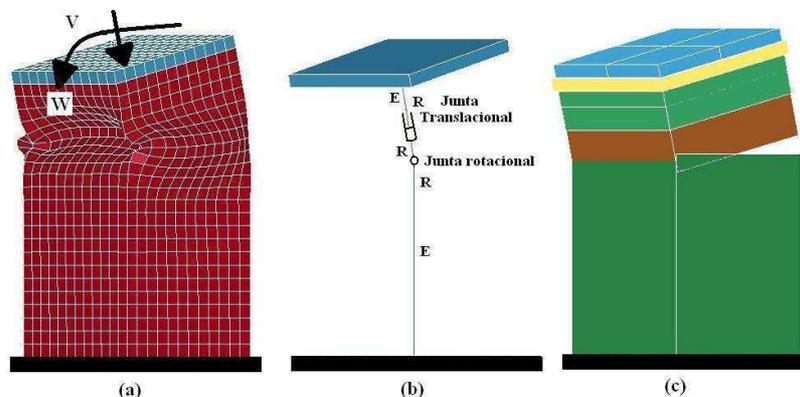


Figura 15: Modelo de casca e modelo simplificado (a) Casca; (b) Simplificado estilo unifilar; (c) Simplificado estilo prisma tridimensional.

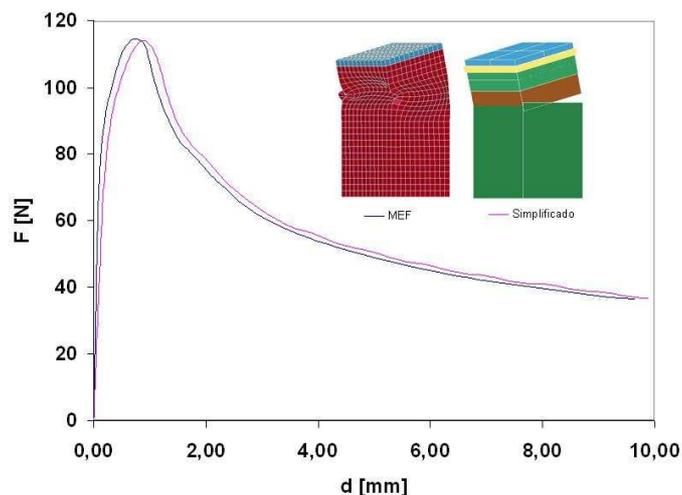


Figura 16: Comparação curvas força versus deslocamento.

Pode-se observar nas Figuras 16 e 17 uma boa aproximação entre as curvas obtidas utilizando MEF e as curvas obtidas utilizando o modelo simplificado. Em função da existência da interação entre os esforços de compressão e flexão existe apenas uma aproximação entre os resultados, não se reproduzindo a precisão encontrada nas Figuras 12 e 14 onde havia atuação de somente um esforço sem a interação.

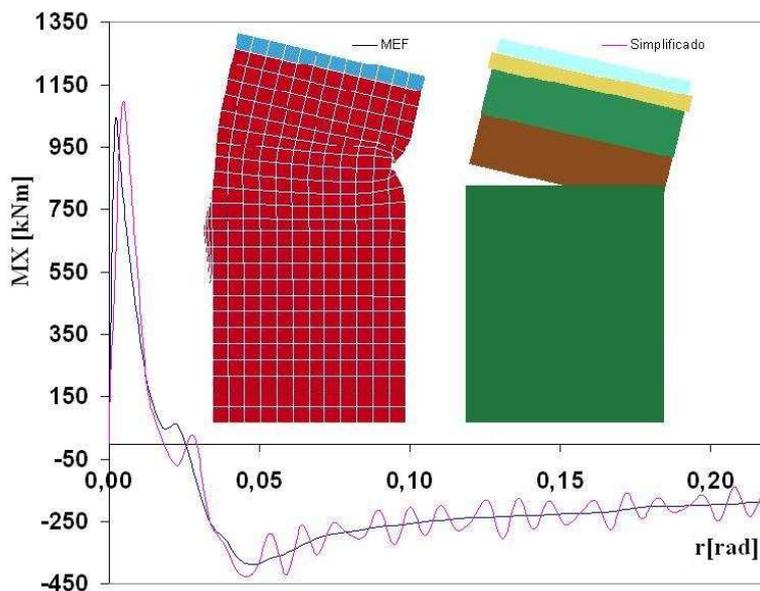


Figura 17: Comparação curvas força versus deslocamento.

#### 6.4 Estruturas onde ocorre interação entre compressão e flexão

A seguir se analisa uma estrutura construída por barras unifilares utilizada como absorvedor de impacto frontal em vagões de trem. A Figura 18 apresenta um exemplo de modelo simplificado utilizando juntas translacionais e rotacionais.

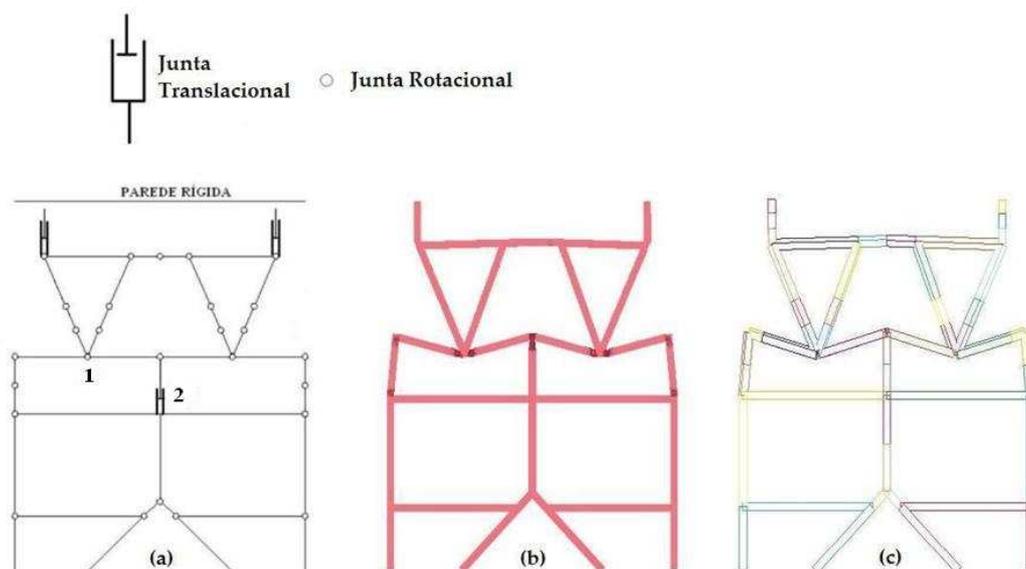


Figura 18: (a) Modelo simplificado; (b) Deformada do modelo de MEF; (c) Deformada modelo simplificado

Se comentam a seguir algumas das características do modelo.

### ***1 - Oscilações indesejáveis nos resultados***

A Figura 18 (a) apresenta um modelo formado por vigas rígidas, vigas elásticas e juntas rotacionais e translacionais. A Figura 18 (c) apresenta a deformada obtida utilizando o software Ls-Dyna para o modelo simplificado no modo de visualização de prismas (3-D). O objetivo de apresentar esta figura aqui é ilustrar a metodologia de escolha da localização das juntas rotacionais e translacionais e visualizar a ação das juntas rotacionais e translacionais. Nem todas as juntas atuaram na mesma intensidade, ou seja, o nível de sollicitação em flexão ou compressão para as diferentes juntas é diferente. Para que consigamos o melhor desempenho do modelo simplificado, se faz necessário o conhecimento prévio das regiões onde ocorrerão as rótulas plásticas, onde deve ser colocada uma junta rotacional, e também as regiões onde predominam os efeitos de amassamento por compressão, onde deve ser colocada uma junta translacional.

Em virtude do diferente nível de sollicitação de cada junta, é conveniente avaliar após uma primeira análise do modelo, o valor real do ângulo  $\varphi$  em cada junta (ver equação 1 e Figura 6). A Figura 19 apresenta a variação do ângulo  $\varphi$  com o tempo para uma estrutura sollicitada com interação de flexão e compressão semelhante à apresentada na Figura 18. A junta rotacional indicada na Figura 19 (a) e (b) corresponde à posição indicada com o número 1 na Figura 18 (a). A indicada com o número 2 corresponde à da Figura 19 (c) e (d).

Observa-se nas Figuras 19 (a) até (d) uma característica de oscilação (vibração) do valor do ângulo  $\varphi$  com que o tempo de realização do evento. Segundo Aparício Sánchez (2001) este efeito pode ser justificado em virtude dos modelos de MEF de estruturas semelhantes à em estudo possuírem um grande número de graus de liberdade em função de possuírem muitos nós para discretizar o sistema. Desta forma, enquanto alguns nós estão se deslocando livremente, outros estão entrando em contato ou rotacionando, provocando um forte movimento relativo entre os nós. Assim sendo, enquanto o centro de massa desloca-se de maneira suave, os demais nós podem estar vibrando bastante. Outra justificativa deve-se ao algoritmo de contato que considera uma distância de tolerância ao detectar penetração de nós ou superfícies. Um nó dentro da zona de tolerância é considerado em contato, mesmo que isto

não aconteça geometricamente. Também devido ao algoritmo de integração no tempo, utilizado pelo programa de elementos finitos ser explícito, são necessários intervalos de tempo  $\Delta t$  extremamente pequenos para diminuir o efeito de oscilação. O passo de tempo precisa ser menor do que o tempo necessário para que um sinal atravesse o menor elemento na velocidade do som e é dado por

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c} = \frac{\Delta x}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} = \frac{85}{\sqrt{\frac{210000}{7.85E-09}}} = 1.64E-05 \quad (2)$$

onde para o problema em questão o menor elemento de viga utilizado tem o comprimento de 85 mm, módulo de elasticidade  $E=210000 \text{ N/mm}^2$  e a densidade do material  $\rho = 7.85E-09 \text{ t/mm}^3$ . Por segurança, o LS-DYNA utiliza um valor inferior ao calculado ( $1.27E-05 \text{ s}$ ). O LS-DYNA calcula automaticamente o valor do passo de tempo necessário e aplica uma margem de segurança reduzindo-o. O mesmo programa também permite que o usuário escolha o número de pontos para saída dos seus arquivos gráficos que são armazenados, neste caso, num arquivo de saída chamado “nodout”.

Outra justificativa para o efeito de oscilação pode ser visualizado na Figura 15 e 17. A posição geométrica relativa entre as juntas rotacionais e translacionais podem produzir efeitos indesejados de interação entre os esforços, uma vez que a ação de uma junta pode interferir com a atuação da outra de forma mecânica, como pode ser observado na Figura 15 (b). Outro efeito que deve ser considerado é que um elemento linearmente carregado pode funcionar como uma mola não amortecida e sua massa vibrar livremente em torno da posição do deslocamento médio e o deslocamento máximo é atingido a cada ciclo.

As Figuras 19(a), (b), (c) e (d) ilustram o efeito da utilização do valor de  $\Delta t$  recomendado pelo programa ( $1.27E-05 \text{ s}$ ) em comparação com um fornecido ao programa com valor dez vezes menor ( $1.27E-06$ ), utilizando-se na plotagem todos os pontos gerados pelo programa (é adotado o mesmo valor de intervalo de tempo para o arquivo de saída “nodout”). Observa-se que na medida em que o intervalo de tempo diminui a oscilação do ângulo  $\phi$  diminui também, o que é indicado pela linha cheia preta que indica os ângulos que realmente ocorrem desconsiderada a oscilação. Nas Figuras 19(a) e (b) são apresentadas a variação do ângulo  $\phi$  com o tempo. A linha grossa cheia une os pontos de pico, que são os valores reais do ângulo  $\phi$  para as juntas rotacionais, descontado o efeito das oscilações produzidas pela vibração. Nas Figuras 19(c) e (d) a linha grossa cheia representa os valores de mínimo, que são os valores reais do ângulo  $\phi$  para uma junta translacional, descontado o valor da oscilação por vibrações.

Neste trabalho propõe-se trabalhar com aproximações de  $5^\circ$  para o valor do ângulo  $\phi$  de tal forma que para a junta rotacional da Figura 19(a) e (b) o valor adotado para  $\phi$  é  $90^\circ$ . Para a junta translacional da Figuras 19(c) e (d) o valor do ângulo  $\phi$  é  $0^\circ$ . Para efeitos de aumentar a velocidade do programa, pode-se trabalhar com um número de pontos de plotagem menor (número de pontos escritos nos arquivos “nodout”), uma vez que se utiliza como regra o valor máximo do ângulo para juntas rotacionais e o valor mínimo para juntas translacionais, sem perda de precisão, como pode ser deduzido a partir da observação das Figuras 19 (a) até (d).

Outra possibilidade para reduzir o efeito de oscilação é a utilização de amortecimento. O software LS-DYNA (1999) possibilita a utilização de coeficientes de amortecimento através da função “*CONSTRAINED\_JOINT\_ESPHERICAL*”, através da qual é possível determinar o valor do coeficiente de amortecimento. Utilizando um valor aproximado do valor do amortecimento crítico consegue-se uma redução apreciável nas oscilações.

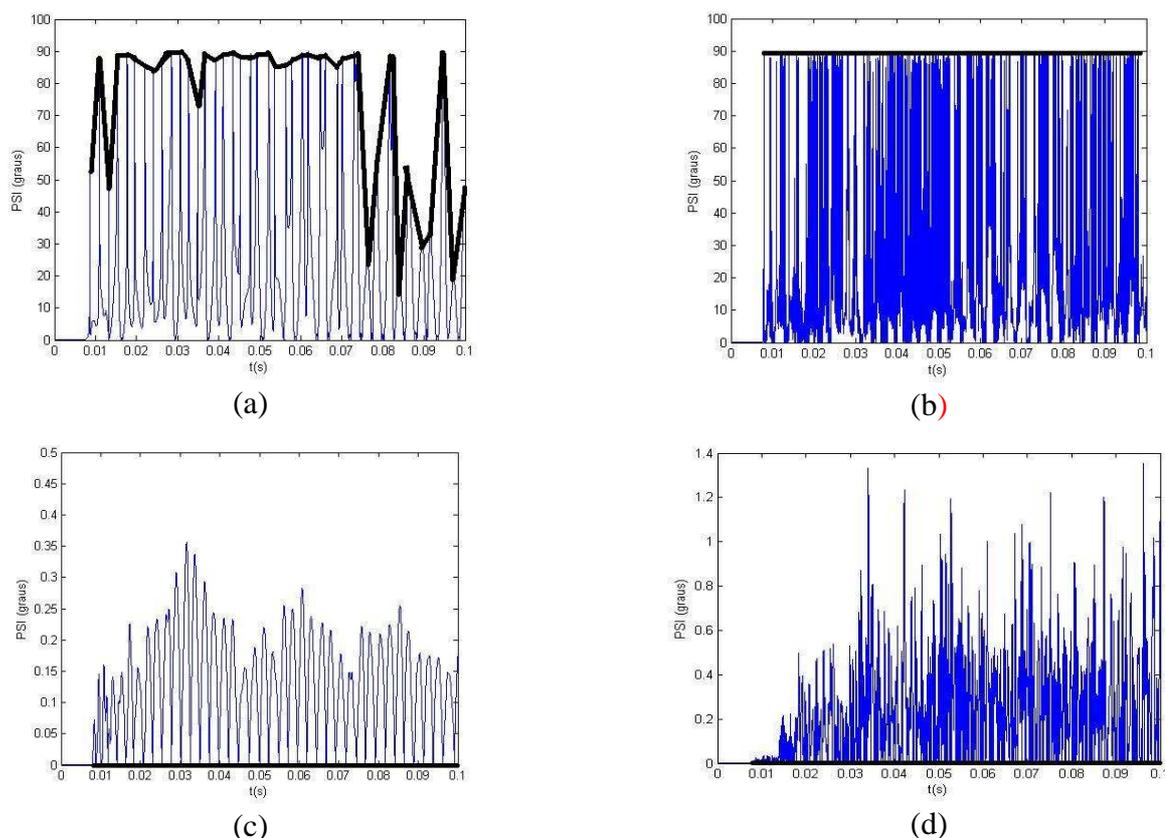


Figura 19: (a) Junta rotacional (7830 pontos); (b) Junta rotacional (78730 pontos); (c) Junta translacional (7830 pontos); (d) Junta translacional (78730 pontos).

Cabe ressaltar que as oscilações são uma característica do Método dos Elementos Finitos quando representando o fenômeno de impacto. Somente podem ser atenuadas com o cálculo do amortecimento crítico da estrutura, o que é uma tarefa difícil e ainda não implementada no nosso modelo. Apresenta-se a análise da estrutura com o intervalo de tempo realizado pelo software e dez vezes melhor para ilustrar que a metodologia de retirar o valor máximo (para juntas rotacionais) e o valor mínimo (para juntas translacionais) sempre vai retirar um valor correto, já que o número de pontos gerados é muito grande. Na prática, para reduzir o tempo computacional, tem-se trabalhado com apenas 51 pontos para o arquivo de saída e com o intervalo de tempo calculado pelo programa, obtendo o valor correto para o ângulo  $\varphi$ , da mesma ordem de grandeza do que os obtidos utilizando o número total de pontos.

## II - Nível de solicitação diferente entre as juntas

Outro aspecto importante a considerar é o diferente nível de solicitações de cada junta. Uma vez que as juntas são solicitadas de maneira diferente e que devido à posição na geometria ocupada pela junta implicar em diferentes solicitações de compressão e flexão e conseqüentemente em uma interação destes esforços diferentes com diferentes ângulos  $\varphi$ , ocorrem alterações significativas nas curvas que descrevem a rigidez do tubo em termos de Força versus Deslocamento e Momento versus Rotação.

Em função disto se faz necessário uma reavaliação do valor do ângulo  $\varphi$  após uma primeira análise utilizando o valor do ângulo de transição (valor médio). Para um melhor entendimento do fenômeno físico pode-se imaginar a estrutura como um mecanismo (“mecano”) de barras composto por barras rígidas unindo as juntas rotacionais e translacionais que por sua vez são

conectados por barras elásticas e/ou elastoplásticas. Numa analogia com um “mecano”, para que o mecanismo possa “funcionar” bem precisa estar bem ajustado, sem folgas. A rigidez das juntas fornecidas através das curvas características para cada ângulo  $\varphi$  faz o ajuste do mecanismo, o que conduz a um “funcionamento” melhor e mais suave, que descreve a resposta da estrutura frente à solicitação de impacto com mais precisão, uma vez que as barras que unem as juntas rotacionais e/ou translacionais são rígidas.

### 6.5 Metodologia de trabalho utilizada na implementação do modelo simplificado

Para considerar o efeito das oscilações e vibrações decorrentes do MEF e também a diferença de solicitação de cada junta propõe-se como procedimento de trabalho uma metodologia dividida em quatro etapas de processamento:

1) **Etapa 1:** avaliar o comportamento da estrutura em análise para determinar a localização das juntas rotacionais e translacionais. Não existe a priori nenhuma regra para determinar a utilização de uma junta esférica ou translacional bem como a localização das mesmas. Uma das exigências da utilização de sistemas multicorpo é o conhecimento prévio do comportamento aproximado da estrutura quando sob impacto. A posição das rótulas plásticas numa estrutura de um absorvedor de impacto não são difíceis de determinar de antemão. Sua determinação pode ser obtida pelo conhecimento a nível qualitativo do comportamento estrutural ou até pela análise prévia da estrutura com um software simples de análise de estruturas de barras.

Como aplicação futura, o programa após uma primeira análise poderia ser dotado da capacidade de identificar as posições na estrutura em que predomina o amassamento ou a flexão.

2) **Etapa 2:** A estrutura é analisada utilizando-se das curvas de transição ( $\varphi=38.45^\circ$ ) para representar as rigidezes dos tubos que formam um modelo substituto simplificado da estrutura real constituído por barras flexíveis e/ou rígidas unidas através de juntas esféricas e translacionais não lineares. A rigidez das juntas esféricas e translacionais não lineares é carregada na forma das curvas características dos tubos de parede fina. Estudos adicionais ainda devem ser realizados para identificar outras possibilidades para o valor do ângulo  $\varphi$  inicial. Neste estágio do trabalho propomos trabalhar com o valor do ângulo  $\varphi=38.45^\circ$  que é o ângulo de transição entre compressão dominante e flexão dominante, neste trabalho denominado ângulo médio. No entanto um estudo adicional deve ainda ser realizado para definir o ângulo  $\varphi$  que produza o melhor resultado. Isto porque o ângulo  $\varphi$  médio caracteriza uma zona de transição entre compressão dominante e flexão dominante, o que acarreta perda de precisão nos resultados. Define-se esta metodologia com o nome MAT (Método do Ângulo de Transição).

3) **Etapa 3:** São retirados do modelo processado na Etapa 2, para os nós onde são colocados as juntas esféricas e translacionais as velocidades de deslocamento  $v$  e de rotação  $w$ . Com estas velocidades, utilizando a equação (1) se calcula o valor de  $\eta$  e através dele o valor de  $\varphi$  para cada junta. Como o valor do ângulo  $\varphi$  varia com o tempo, a correção vai utilizar o maior valor deste ângulo para as juntas esféricas e o menor valor para as juntas translacionais, verificado durante todo o intervalo de tempo do evento a ser analisado. Pretende-se com este procedimento contornar o efeito das oscilações indesejáveis características do sistema. Este valor de  $\varphi$  vai ser utilizado para definir a nova curva a ser utilizada na análise da estrutura de barras. Esforços adicionais ainda devem ser realizados para definir com maior precisão o valor real do ângulo  $\varphi$  a ser adotado.

4) **Etapa 4:** A estrutura é analisada novamente, utilizando-se das curvas relativas ao ângulo

$\varphi$  calculadas na Etapa 3 para representar as rigidezes de cada junta. Esta metodologia recebe o nome de MAR (Método do Ângulo Real).

## 7 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

### 7.1 Algoritmo de otimização

O programa otimizador utilizado neste trabalho é a toolbox de Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox 2.0.2*) do programa MatLab R14 (2006b).

A metodologia de otimização a ser seguida é composta das seguintes fases:

**1) Construção de um arquivo de propriedades dos perfis estruturais.** Todo perfil estrutural que possa ser utilizado na estrutura em análise e otimização deve ter suas curvas características de rigidez (relação constitutiva) definida e numerada neste arquivo. Curvas para diferentes seções são definidas utilizando o método convencional de elementos finitos não linear. Também se faz necessário a identificação e a vinculação entre as curvas características de Força versus Deslocamento e Momento versus Rotação para um mesmo perfil estrutural através de um número que codifica e relaciona as mesmas, vinculando-as a um único perfil.

**2) Construção do modelo simplificado da estrutura.** Os elementos estruturais são representados por vigas de material rígido ou elasto-plástico. Os elementos estruturais de material rígido são unidos por juntas translacionais ou juntas esféricas conforme o comportamento esperado do elemento quando sob carga. Elementos elásticos ou elasto-plásticos podem ser utilizados como elementos de união entre os elementos formados por material rígido. Nesta etapa é definido para cada elemento estrutural um rótulo [a b c d] que funciona como se fosse uma variável para o programa de otimização. Através deste rótulo é gerada a numeração das curvas características de rigidez da seção de cada perfil estrutural que são utilizadas para definir as características das juntas translacionais e esféricas. Este elemento estrutural identificado por este rótulo pode variar de seção e forma. As seções e formas são definidas através do arquivo de propriedades de perfis estruturais pré-analisados citados no item anterior. A geometria, numeração dos nós, conectividades, condições de contorno, comandos de controle, carregamentos, definição de propriedades geométricas e dos materiais, identificação das juntas translacionais e esféricas, identificação das partes constituintes do modelo e o fornecimento das informações disponíveis no arquivo de propriedades dos perfis estruturais devem ser fornecidos para alimentar o programa de análise dinâmica.

**3) Construção da função objetivo.** A função objetivo é uma medida das características do sistema que está sendo otimizado. Segundo Ambrósio (2001), funções objetivo típicas são a aceleração máxima que ocorre num componente do sistema durante o impacto, a menor velocidade de deslocamento no final do período de tempo de análise desejado, a energia total, cinética e interna da estrutura ou componente mecânico, a geometria ou parte da geometria da estrutura ou ainda medidas de dano. No âmbito da utilização de Algoritmos Genéticos uma função objetivo pode ser muito mais que isto, se tornando um algoritmo computacional com capacidade de capturar ou calcular o parâmetro que se deseja otimizar.

Dentro do programa que representa a função objetivo devem ser realizadas várias atividades: a) A partir do rótulo que define a numeração de cada elemento componente da estrutura em análise, construir a numeração das curvas características do comportamento e rigidez do mesmo que definirão as relações constitutivas das juntas translacionais e esféricas que são utilizadas para unir os elementos estruturais rígidos utilizando para tal as curvas de transição ( $\varphi=38.45^\circ$ ). b) Escrever um arquivo de entrada para o programa de análise não linear

dinâmica. c) Acionar o sistema operacional e mandar rodar o programa de análise não linear dinâmica. d) Através dos arquivos de saída gerados pelo programa de análise não linear dinâmica capturar os valores das velocidades de deslocamento e rotação dos pontos onde forem colocadas juntas translacionais ou rotacionais e calcular o ângulo  $\phi$  que define a relação entre estas velocidades utilizando a equação (1). e) Reconstruir a numeração das curvas características do comportamento e rigidez para cada junta translacional ou rotacional a partir da definição no item anterior do novo ângulo  $\phi$ . f) Acionar o sistema operacional e mandar rodar novamente o programa de análise não linear dinâmica utilizando agora as curvas relativas aos novos ângulos corrigidos. g) Através dos arquivos de saída gerados pelo programa de análise não linear dinâmica calcular a medida característica do sistema que está sendo otimizado, ou seja, o valor da função objetivo. e) Escrever um arquivo de saída com a relação dos rótulos dos perfis estruturais utilizados em cada passo de interação e o valor ótimo durante o processo de otimização bem como o valor da função objetivo.

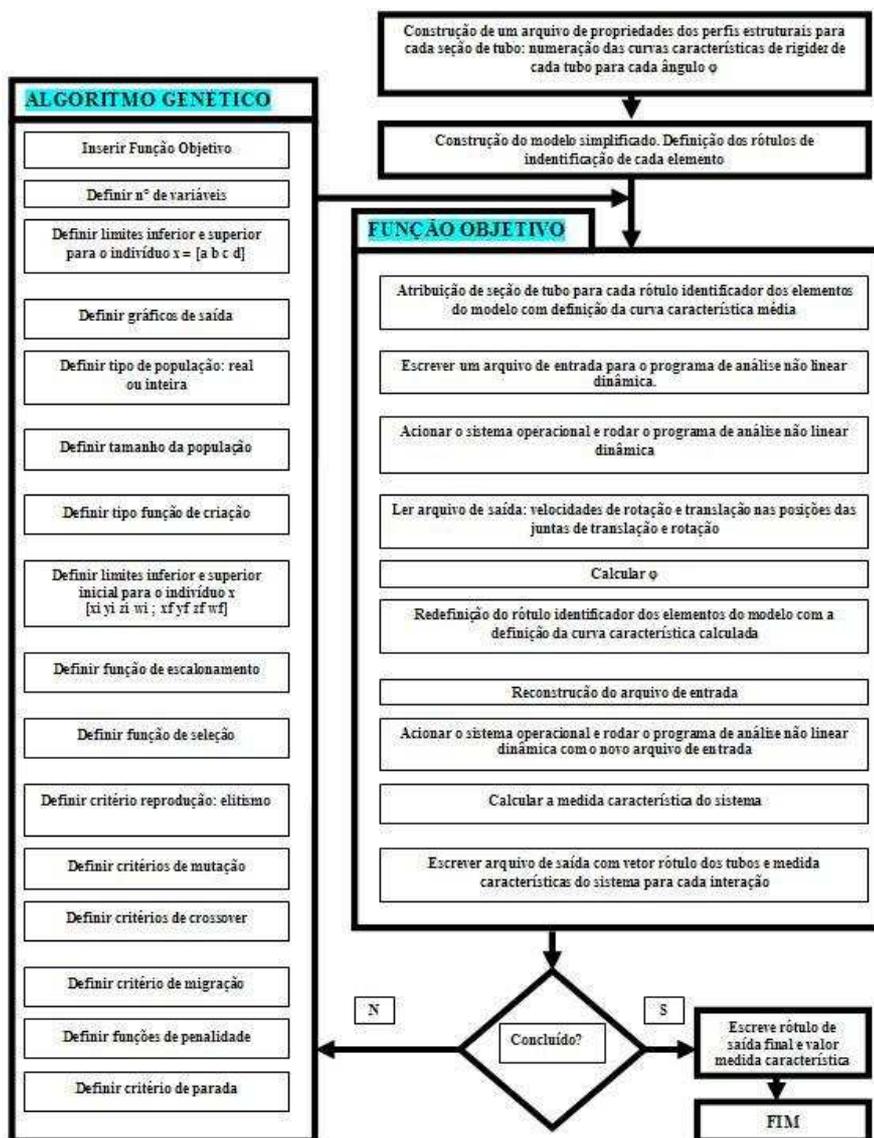


Figura 20: Fluxograma de otimização para o problema de impacto a ser analisado.

**4) Acionamento do programa de algoritmo genético (GA).** Para o acionamento do programa de otimização por algoritmos genéticos deve inicialmente ser definido o nome do arquivo da função objetivo, o número de variáveis, identificar o tipo de população (inteiro ou real), o tamanho da população (o número de indivíduos que existem em cada geração), a função de criação (a função que cria a população inicial), o limite superior e inferior da população inicial e os critérios de parada (como o algoritmo termina o procedimento de otimização). O programa de GA trabalha com a seguinte metodologia: a) Inicialmente é criada uma população inicial com o número de variáveis e tamanhos definidos pelo usuário. b) O programa roda para cada indivíduo desta população o programa função objetivo apresentada no item três. c) O GA gera assim uma população de respostas para a função objetivo. d) A partir destas respostas aplica os procedimentos relativos ao algoritmo genético apresentados na seção 4 e) Attingido o critério de parada o algoritmo genético termina o procedimento de otimização e fornece como resultados o melhor valor para a característica do sistema que está sendo otimizados (valor da função objetivo), o motivo do término do procedimento de otimização e o valor do ponto final (valor ótimo). O Fluxograma apresentado na Figura 20 ilustra o processo.

## 7.2 Problema proposto

Nesta seção se pretende otimizar estruturas absorvedoras de impacto formadas por tubos de seção quadrada de parede fina. No problema de otimização proposto, a geometria da estrutura absorvedora de impacto é fixa, permitindo-se variar as dimensões e espessura dos tubos. Os tubos disponíveis para a fabricação da estrutura absorvedora de impacto são apresentados na Tabela 1.

Como estrutura de referencia será adotada a composta com todos os perfis de dimensão 80x80x2.4mm, a estrutura mais pesada e mais forte. Desta forma se terá um parâmetro para comparação dos resultados obtidos. A geometria do tubo é fixa. A estrutura é formada pelos tubos indicados na Tabela 1 e tem seus elementos identificados por uma variável a, b, c e d, conforme mostrado na Figura 21, letras que poderão assumir os valores numéricos dos rótulos definidos na Tabela 1, de forma aleatória, de acordo como definido pelo algoritmo genético.

Rótulo	Dimensão b	Espessura t
10	40	1.0
11	40	1.2
12	50	1.0
13	50	1.5
14	60	1.5
15	60	2.0
16	70	1.5
17	70	2.0
18	80	1.75
19	80	2.4

Tabela 1: Rótulos dos tubos.

A função objetivo é uma medida das características do sistema que está sendo otimizado. A função objetivo  $f(x)$  que se quer otimizar (Eqs. 4 a 9) dependem do individuo  $x$  dado por

$$x = [a \ b \ c \ d] \quad (3)$$

onde a, b, c, d são os rótulos que definem a seção dos tubos apresentados na Tabela 1.

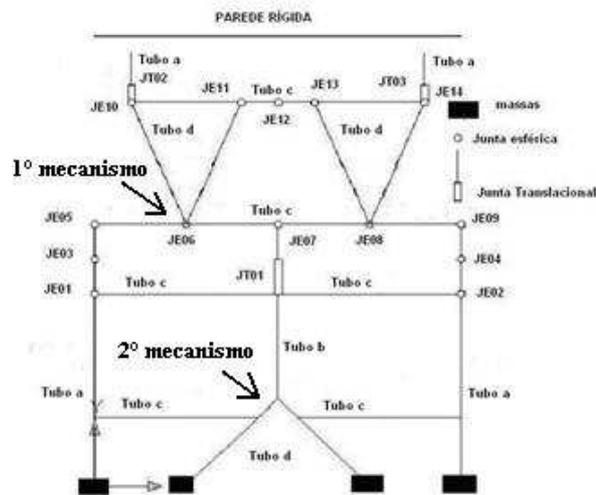


Figura 21: Geometria e identificadores das variáveis

As funções objetivos avaliadas no exemplo proposto são discriminadas a seguir:

*Minimizar / Maximizar  $f(x)$*

$$f(x) = \frac{a}{a_{\max}} \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{v}{v_{\max}} \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{E_c}{E_{c\max}} \quad (6)$$

$$f(x) = 0.5 \frac{v}{v_{\max}} + 0.5 \frac{a}{a_{\max}} \quad (7)$$

$$f(x) = 0.5 \frac{E_c}{E_{c\max}} + 0.5 \frac{a}{a_{\max}} \quad (8)$$

com

$$10 \leq a, b, c, d \leq 19 \quad e \quad dz_{\max} < 320mm \quad (9)$$

onde  $a$  é a desaceleração máxima verificada durante o evento,  $a_{\max}$  é a desaceleração máxima verificada na estrutura mais forte (com todos os tubos com rótulo 19),  $v$  é a velocidade no instante final do evento,  $v_{\max}$  é a velocidade máxima do evento,  $E_c$  é a energia cinética no instante final do evento,  $E_{c\max}$  é a energia cinética máxima para a estrutura mais forte (com todos os tubos com rótulo 19),  $dz_{\max}$  é o deslocamento máximo permitido para a o nó equivalente a posição JE06 e JE08. Os termos utilizados nos denominadores das expressões das equações 4 a 9,  $E_{c\max}$ ,  $v_{\max}$  e  $a_{\max}$  são os valores utilizados para normalizar cada termo da equação, deixando-os com a mesma ordem de grandeza, sem definir prioridade para qualquer dos objetivos. Os valores para  $E_{c\max}$  e para  $a_{\max}$  assumido foi o da estrutura com individuo  $x =$

[19 19 19 19 ], ou seja, a geometria com todos os tubos de seção 80x80x2.4 mm. Para  $v_{max}$  foi assumido o valor inicial de velocidade prescrito antes do impacto de 2000 mm/s.

Ao longo deste trabalho, a minimização das Equações (4 a 9) é tratada como uma otimização multi-objetivo. Porém, dentro da terminologia da otimização, uma otimização multi-objetivo trata da minimização/maximização de um vetor de funções, sendo cada componente um objetivo a ser otimizado. A otimização desse vetor de funções consiste em achar a Região Ótima de Pareto. A otimização proposta através das funções objetivo das equações (4 a 9) obtém a inter-relação entre diversos critérios de otimização através da normalização de cada um. Desta forma, se encontra apenas um valor ótimo, ao invés de um conjunto ótimo, como seria a otimização de um vetor de funções. O programa otimizador utilizado neste trabalho utiliza Algoritmos Genéticos.

### 7.3 Otimização de uma estrutura absorvedora de impacto “*end underframe*”

A seguir será realizada a otimização da estrutura de um sistema de absorção de impacto (*end underframe*) formado por tubos de seção transversal de seção quadrada utilizando as curvas características dos tubos médias ( $\varphi=38.45^\circ$ , MAT) e as curvas para os ângulos corrigidos calculadas através do modelo substituto simplificado, com uma aproximação de  $5^\circ$  (MAR). O problema a ser analisado consiste em reduzir a função objetivo aceleração, velocidade e energia cinética adimensionalizados como apresentado nas equações (4) até (9) no tempo especificado (0.09 s) utilizando uma “biblioteca” de tubos limitada, somente os disponíveis até o presente estágio deste trabalho. Logo o problema apresentado não busca um resultado “ótimo” e sim a demonstração da metodologia utilizada até o presente momento. Esforços adicionais estão sendo feitos no sentido de desenvolver a obtenção das curvas de interação entre os esforços de compressão e flexão de forma analítica e assim ter uma grande gama de dimensões de tubos e espessuras a disposição que desta forma possibilitariam a “otimização” do problema. Também o número de gerações utilizado é pequeno, cinco gerações, com a intenção de tornar o processo mais rápido, uma vez que o objetivo do trabalho não é buscar a melhor solução no momento, mas sim demonstrar as possibilidades da metodologia proposta.

Inicialmente foram construídos arquivos com as propriedades dos perfis estruturais formados por tubos de parede fina de seção quadrada apresentados na Tabela 1. Foram construídos 20 curvas por tubo, com  $\varphi$  variando de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , com curvas construídas a cada  $5^\circ$  e mais a curva média de  $\varphi=38.45^\circ$ , totalizando 200 curvas. As curvas médias foram numeradas de acordo com um código numérico definido através de números variando de 10 a 19. A numeração das curvas médias de momento foi obtida somando-se o número 10 a cada um destes rótulos, obtendo-se assim uma numeração associada variando de 20 a 29 e garantindo-se desta forma que para cada curva de força fosse mantida a correspondente curva de momento. A numeração das curvas corrigidas foram obtidas multiplicando-se o rótulo das curvas médias por 100 e somando-se o valor do ângulo  $\varphi$  calculado com arredondamento de  $5^\circ$ , ou seja, 0,5,10,15,...,90°. Desta forma a numeração das curvas corrigidas assumem formatos do tipo 1010, 1945, 1500, etc.

A seguir constrói-se a geometria do modelo estrutural simplificado que vai representar a estrutura conforme mostrado na Figura 21. Neste exemplo de aplicação a geometria e o material são características pré-definidas e fixas do projeto inicial. As dimensões das seções podem variar entre os tubos com rótulos 10 a 19, assumindo qualquer valor dentro deste intervalo, de acordo com a indicação na Figura 21. O vetor que fornece as variáveis de otimização assume o formato [Tubo a, Tubo b, Tubo c, Tubo d] (Figura 21) sendo que as

variáveis [a b c d] podem assumir qualquer valor definido pelo algoritmo de otimização desde que dentro do intervalo entre o rótulo 10 e o 19 ou seja o vetor [10 10 10 10 ; 19 19 19 19 ] e com a restrição de ser um valor inteiro. Isto quer dizer que não existe uma dimensão inicial para as seções dos tubos, o programa de GA é que vai aleatoriamente gerar a sequência numérica que definirá estes valores.

Na Figura 21 também são apresentados as posições das juntas translacionais e juntas rotacionais utilizadas para representar as propriedades que caracterizam a rigidez de cada tubo, definida por suas curvas de Força versus Deslocamento e Momento versus Rotação. A posição das juntas rotacionais e translacionais é fixa, não podendo ser alterada pelo algoritmo de otimização neste problema. O GA também não está apto para alterar a definição do tipo de junta (se junta translacional ou rotacional) nem eliminar a presença de qualquer tipo de junta, que são pré-definidas pelo usuário. Como implementação futura, pode-se agregar este tipo de capacidade para o algoritmo de otimização juntamente com a capacidade de identificar em quais pontos deve haver uma junta rotacional e em quais pontos deve haver uma junta translacional e também identificar a interação a ser considerada entre os esforços de tração e flexão.

A estrutura “*end underframe*” impacta contra uma parede rígida com uma velocidade de 2000 mm/s na direção z, para caracterizar uma análise quase estática.

Na Figura 21 se apresenta o modelo bem como a localização das massas que acrescentam 1800 kg sobre a estrutura. O modelo simplificado proposto utiliza juntas esféricas e translacionais formadas por vigas do tipo Hughes-Liu (LS-Dyna, 1999) rígidas que por sua vez são conectadas entre si por vigas do mesmo tipo de material elástico.

Na Figura 21 também se apresenta a discretização utilizada no modelo simplificado. Foram utilizadas tres juntas translacionais, quatorze juntas esféricas, cinquenta elementos de viga, 46 nós (552 graus de liberdade) e quatro elementos de massa. Cada junta translacional ou esférica é formada por dois elementos de viga rígida.

Os problemas de otimização estudados são os apresentados nas equações (4 a 8) com as restrições apresentadas na equação (9). Consistem em obter utilizando os perfis estruturais fornecidos (rótulos de 10 a 19) uma estrutura para o absorvedor de impacto que minimize as funções objetivas já referidas no tempo estipulado de 0.09 segundos.

Na utilização do algoritmo genético foi adotado uma população inicial de 20 espécimes, o tipo de população é real (arredondado para inteiro pela função objetivo) e o máximo número de gerações permitido foi 5.

Estrutura	Critério/equação	$f(x)$	Indivíduo	$a$ ( $m/s^2$ )	$v$ (mm/s)	$E_c$ (Nmm/s)	Massa (Kg)
1	Aceleração/(4)	0.213	[ 10 10 10 10 ]	15.19	1682.8	2.70E06	20.12
2	Velocidade/(5)	0.179	[ 15 13 17 15 ]	46.51	358.7	9.62E04	63.13
3	Energia Cinética/(6)	0.003	[ 14 13 17 13 ]	43.56	146.9	1.21E04	53.91
4	Velocidade e aceleração/(7)	0.395	[ 14 12 17 16 ]	37.35	531.4	1.55E05	57.37
5	E. Cinética e aceleração/(8)	0.283	[ 14 12 17 16 ]	37.35	531.4	1.55E05	57.37
6	Ref. (mais forte)	-	[ 19 19 19 19 ]	71.06	1132	1.15E06	96.09

Tabela 2: Resultados da otimização.

A obtenção dos dados da tabela 2 está explicada na seção 7.2, equações (4) até (9). Os

valores obtidos para energia cinética, velocidade e aceleração (LS-Dyna,1999) estão representados nas Figuras 23, 24 e 25 para todo o tempo de duração do evento.

A Figura 22 apresenta o modo de deformação obtido para os modelos de MEF e o modelo simplificado para a estrutura otimizada no tempo de 0.09 segundos. Pode ser observado na Figura 22 que a estrutura que apresenta maiores deslocamentos é a Estrutura 1 enquanto que a mais rígida é a Estrutura 6. As Estruturas 2, 3, 4 e 5 apresentam comportamentos semelhantes. A Figura 23 apresenta os resultados comparativos para Energia Cinética absorvida. Pode-se observar na Figura 23 que a Estrutura 1 absorve muito pouca energia cinética durante o evento de impacto e que portanto é inadequada como estrutura absorvedora de impacto.

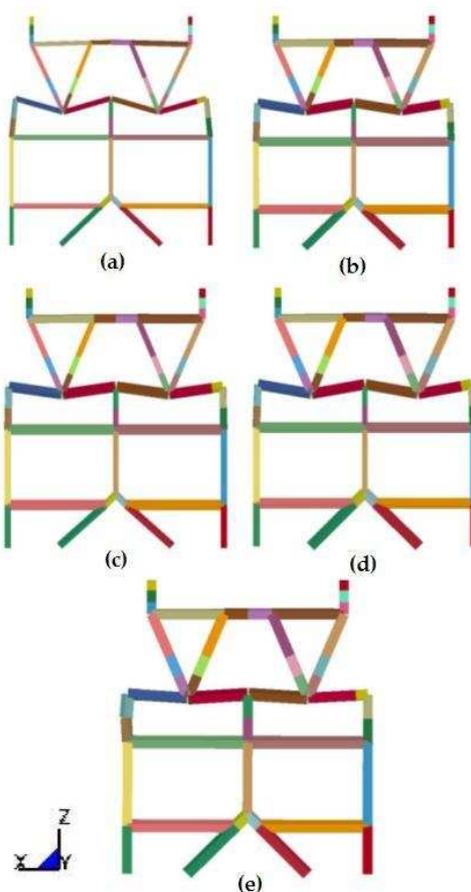


Figura 22: Deformada (a) Estrutura (1); (b) Estrutura 2; (c) Estrutura 3; (d) Estrutura (4 e 5); (e) Estrutura 6.

A Estrutura 6 (a mais forte) também é inadequada pois absorve a energia cinética num tempo inferior ao especificado, a estrutura bate contra a parede rígida e por efeito elástico volta em sua trajetória adquirindo energia cinética. Também, devido a este fato, é inadequada sob o ponto de vista de absorção de impacto no tempo proposto. As Estruturas 2, 3, 4 e 5 apresentam um comportamento semelhante e adequado como solução do problema proposto. A estrutura com melhor comportamento sob o ponto de vista de redução de energia cinética é a 3. A Figura 24 apresenta os resultados comparativos para a redução de velocidade. A Estrutura 1 (a mais fraca) apresenta um comportamento ruim, pois reduz muito pouco a velocidade final da estrutura. A estrutura 6, por outro lado, apresenta uma redução a zero da velocidade num tempo muito curto, com o repique da estrutura, que retorna em sua trajetória devido a efeito elástico e readquire velocidade, sendo portanto inadequada sob este aspecto. As estruturas 2, 3, 4 e 5 apresentam comportamento semelhante, sendo a melhor a Estrutura 3.

Como foram utilizadas somente cinco gerações no algoritmo genético, justifica-se que a solução melhor não tenha sido a 2, onde o critério de minimização é a velocidade. Isto justifica a diferença dos valores de velocidade das estruturas 2 e 3, uma vez que é característica do algoritmo gerar populações aleatórias de tubos e por isto encontrar resultados diferentes em cada vez que é rodado, estando fixo o parâmetro número de gerações. Devido ao pequeno número de gerações, as soluções apresentadas não são ótimas, podendo existir outra combinação de tubos mais adequada para solução do problema de redução da velocidade e energia cinética a zero no tempo de duração do evento especificado (0.09 s).

A Figura 25 apresenta uma comparação entre as capacidades de desaceleração das estruturas. A melhor estrutura por este critério é a 1, a que produz o menor pico de desaceleração. A pior estrutura sob este aspecto é a seis, onde se verifica o maior pico de desaceleração. As estruturas 2, 3, 4 e 5 apresentam comportamento semelhante.

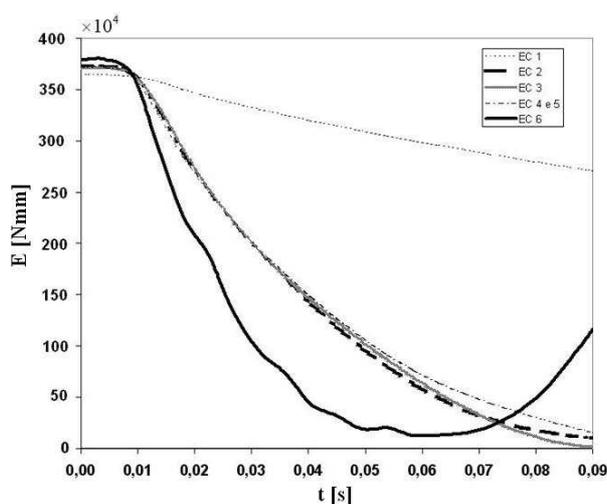


Figura 23: Energia Cinética.

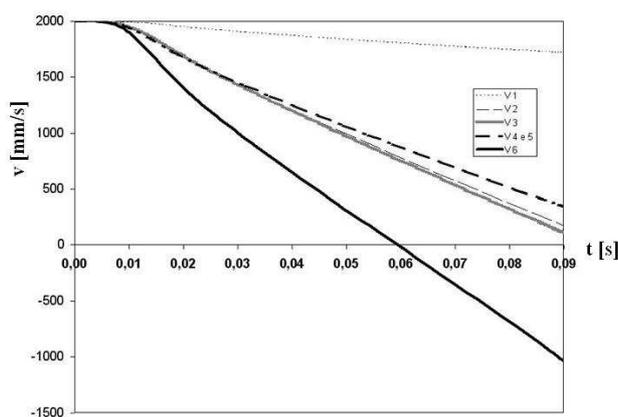


Figura 24: Comparação velocidades.

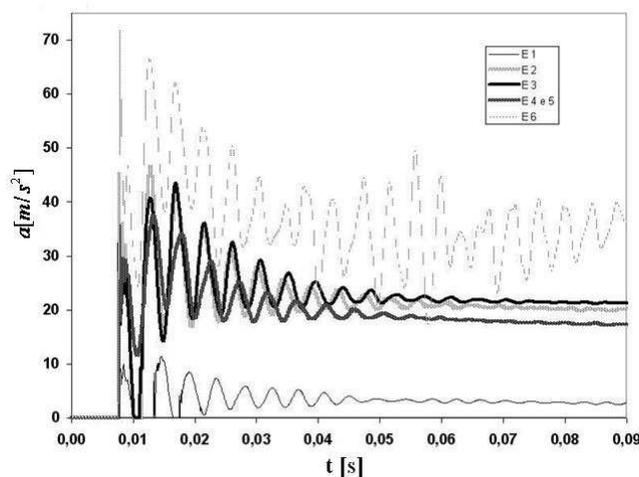


Figura 25: Comparação aceleração.

Considerando o comportamento global da estrutura, levando em conta todos os aspectos citados, conclui-se que a melhor estrutura é a 3, que teve como critério a minimização da energia cinética. Com a minimização deste critério, tem-se uma redução da velocidade muito boa dentro de período de tempo especificado, aliado a uma desaceleração média, com absorção de praticamente toda a energia cinética dentro do período de tempo especificado. Observa-se também na deformada das estruturas apresentadas a ausência de deformação no segundo mecanismo de deformação (segundo V). Isto se justifica em virtude da alta rigidez desta região gerada pelos tubos disponíveis bem como pela geometria ser fixa no problema estudado.

## 8 CONCLUSÕES

Neste trabalho se realizaram simulações de impacto contra parede rígida de estruturas formadas por tubos de parede fina utilizando modelos simplificados. Para os primeiros três casos analisados (seção 6.1, 6.2 e 6.3), impacto frontal, impacto transversal e interação entre os esforços de compressão e flexão atuando sobre um tubo, pode-se observar a correta utilização da metodologia. Na seção 7.3 se apresenta um exercício de otimização utilizando uma biblioteca de curvas características dos tubos obtidas por MEF e algoritmos genéticos. A metodologia apresentada é adequada para solução de problemas semelhantes ao apresentado. No entanto, a metodologia pode ainda ser significativamente melhorada a partir da implementação de soluções analíticas para determinação das curvas características dos tubos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramowicz, W. *Crashworthiness. Energy management and occupant protection*. Springer WienNewYork, pp 83-138, 2001.
- Ambrósio, J.A.C. *Crashworthiness. Energy management and occupant protection*. Springer WienNewYork, pp205-302, 2001.
- Aparício Sánchez, C. A. *Estudo de impacto usando elementos finites e análise não linear*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

- Dias de Meira Junior, A., Walber, M., Iturrioz, I. Avaliação de diferentes metodologias de análise de estruturas de barras submetidas a impacto contra um obstáculo rígido. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Mecánica Computacional Vol XXV*, pp. 667-685), 2006.
- Goldberg, D. E. “*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989.
- Jones, N. *Crashworthiness. Energy management and occupant protection*. Springer WienNewYork, pp 3-81, 2001.
- Kim, H., Wierzbicki, T. Crush behavior of thin-walled prismatic columns under combined bending and compression. *Computer and Structures* 79, pp 1417-1432, 2001.
- Ls-Dyna, User Manual – *Non linear Dynamic Analysis of Structures - Version 950-d* Livermore Software Technology Corporation 7374, las Pocitas Road Livermore, 1999.
- The MathWorks, Inc. *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox User’s Guide*. The Mathworks, Inc. 3 Apple Hill Drive. Natick, MA 01760-2098, 2004.