3 Metodologia Empregada Para Análise de Impacto

Durante uma colisão veicular existe uma série de fenômenos ainda não muito bem compreendidos devido às condições de não linearidade envolvidas. Entre estes fenômenos pode-se citar a absorção de energia de impacto pela estrutura.

Segundo Frei *et al.* (1999) parte da energia de impacto oriunda de uma colisão frontal é absorvida pelo pára-choque localizado na estrutura veicular, conforme ilustrado na Figura 35(a). Durante os últimos anos, o pára-choque sofreu uma grande evolução devido ao objetivo de redução de peso dos veículos. Antes feitos a partir de lâminas de metal, agora os pára-choques são construídos utilizando-se polipropileno que é um material polimérico, pertencente à categoria dos plásticos de engenharia (MEDINA, 2002).

Apesar de atualmente os pára-choques na grande maioria dos veículos não serem mais de material metálico, decidiu-se neste trabalho analisar um modelo em metal devido à facilidade de obtenção da matéria prima e construção.

A escolha do alumínio é devido à evidência do mesmo nos atuais projetos de estruturas veiculares. Em países onde a energia elétrica necessária a produção do alumínio é oriunda de fontes limpas verifica-se que o menor peso específico contribui bastante para redução dos níveis de emissões de poluentes (dióxido de carbono CO_2) ao meio ambiente. Qiao, Chen e Che (2006) afirmam que a redução na emissão de partículas de CO_2 já chega a 25%, se comparada com as emissões geradas por estruturas veiculares construídas em sua grande maioria em aço.

Devido ao exposto acima este trabalho será composto de uma análise, experimental e numérica, em uma estrutura do tipo pórtico na forma de "U" representativa da parte frontal de um veículo construída em alumínio. O modelo geométrico simplificado da estrutura descrita por Frei *et al.* (1999) também está representado na Figura 35(b).



Figura 35(a) e (b) – Estrutura frontal de veículo. Fonte: Frei *et al.*,(1999). Estrutura simplificada em "U".

A análise do impacto de uma massa rígida contra uma estrutura deformável "U" tem como objetivo fornecer dados sobre o comportamento dinâmico da estrutura durante o carregamento. Pela configuração do carregamento aplicado, verifica-se que o mesmo pode representar, de maneira simplificada, uma colisão da parte frontal do veículo com um objeto rígido como, por exemplo, um poste de luz ou uma árvore.

A metodologia para a análise de impacto mencionada é composta por uma parte experimental e uma parte numérica que deverão ser comparadas de modo a se estabelecer uma melhor análise. O método experimental escolhido para aplicação do impacto é a queda de peso (*Drop Weight*) através de uma máquina que fornece energia potencial gravitacional máxima de 995 J. Para a simulação numérica do impacto adotou-se o método por elementos finitos realizado por programas comerciais como, por exemplo, Cosmosworks e Ansys – LS Dyna.

3.1 Determinação de Propriedades Mecânicas do Material

As propriedades mecânicas necessárias a simulação numérica foram obtidas por um ensaio de tração, realizado em uma máquina com controle por taxa de deformação. A taxa de deformação aplicada foi de 0,2% por segundo e a aquisição dos dados foi feita com período de 0,05s, o que forneceu uma frequência de 20 dados por segundo (Hz). Os corpos de prova cilíndricos para realização dos ensaios de tração foram confeccionados segundo norma ASTM E 08-M em um torno operado por comando numérico (CNC). A Figura 36 ilustra o corpo de prova com as dimensões adotadas segundo a norma ASTM citada.



Figura 36 – Especificação de corpo de prova para tração. Fonte: Norma ASTM E8M – 04

Segundo a norma as especificações no corpo de prova, na Figura 30, representam os seguintes itens:

A = comprimento total da seção reduzida = 54 mm;

G = comprimento da parte útil = $45 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$;

D = Diâmetro = 9 mm; e

R = Raio de adoçamento = 8 mm.

O corpo de prova utilizado para levantamento das propriedades mecânicas do alumínio 6351-T6 na Figura 37. O máquina de ensaio universal utilizada para o ensaio de tração está representado na Figura 38



Figura 37 - Corpo de Prova preparado para o ensaio de tração. Fonte: ITUC - PUC-RJ.



Figura 38 - Máquina universal para ensaio de tração. Fonte: ITUC - PUC-RJ.

A curva tensão x deformação do material obtida é apresentada na Figura 39.



Figura 39 – Curva tensão x deformação convencional de uma liga de alumínio 6351-T6.

As propriedades mecânicas de um material são geralmente conhecidas através de ensaio de tração normalmente realizado em condições estáticas, ou seja, com baixas taxas de deformação. Segundo Dieter (1981) as taxas de deformação para condição estática variam de 10^{-4} a 10^{0} s⁻¹ e em Meyers (1994) a condição estática é alcançada com taxas de deformação entre 10^{-5} a 10^{1} s⁻¹. Porém conforme mencionado no Capítulo 2 materiais sensíveis a taxa de deformação possuem

variações em suas propriedades mecânicas conforme alterações nas taxas de deformação impostas aos mesmos.

Em situações de impacto onde se verifica taxas de deformação mais altas é conveniente investigar o comportamento mecânico do material nas referidas condições através de ensaios de tração dinâmicos com o ajuste da taxa de deformação. Os ensaios de tração dinâmicos podem ser realizados em máquinas de ensaio universal que permitam estratégia de controle por taxa de deformação (s^{-1}) e/ou velocidade de deslocamento do cabeçote transversal (mm/s).

Em Nóbrega (2009) encontra-se um estudo do comportamento mecânico de alguns materiais de aplicação relevante na área industrial, em função das estratégias de controle do ensaio de tração que permitem taxas de deformação diferentes. Os materiais testados no mencionado trabalho foram o aço carbono comum SAE 1020, o aço liga SAE 4340, o aço inox 304, alumínio e o latão.

Os ensaios de tração realizados por Nóbrega (2009) demonstram que a taxa de deformação influencia nas propriedades mecânicas do material, mas também confirma que alguns materiais são insensíveis ou pouco sensíveis à taxa de deformação. Dentre os materiais testados o que apresenta maior sensibilidade à taxa de deformação é o aço, tanto para ensaios controlados por taxa quanto para os controlados por velocidade. A tensão de escoamento do aço SAE 1020 com controle por taxa de deformação teve uma variação de até 79%, enquanto que para controle por velocidade houve pouca variação das propriedades mecânicas. Segue na Figura 40 a curva tensão x deformação que mostra o comentário acima.



Figura 40 – Comparação das curvas tensão x deformação de um aço SAE 1020 obtida por controle de taxa de deformação e por controle de velocidade. Fonte: (Nóbrega, 2009).

O aço SAE 4340 também apresenta comportamento mecânico bastante diferente quando este é testado a altas taxas de deformação. A Figura 41 mostra a variação das propriedades mecânicas deste material.



Figura 41 – Variação das propriedades mecânicas de um aço SAE 4340 com o aumento da taxa de deformação. Fonte: (Nóbrega, 2009).

O aço inox 304 não apresenta alterações significativas das propriedades mecânicas mesmo com o aumento das taxas de deformação ou das velocidades de deslocamento do cabeçote transversal da máquina de ensaio.

Para este estudo foram utilizados seis corpos de prova: dois para testes a alta taxa de deformação, um para o teste de média e um para o teste de baixa taxa de deformação. Para os ensaios com controle por alta velocidade e com controle por baixa velocidade também foram utilizados um corpo de prova. A Figura 42 mostra as curvas de tensão x deformação do aço inox 304 obtidas para diferentes níveis de taxa e velocidades de cabeçote.



Figura 42 – Comparação das curvas tensão x deformação de um aço inoxidável SAE 304 obtidas com ensaios de tração controlados por taxa de deformação e velocidades. Fonte: (Nóbrega, 2009)

Com os ensaios de tração dinâmicos verificou-se que o alumínio e o latão não têm seus comportamentos mecânicos alterados com a variação das taxas de deformação ou das velocidades de deslocamento do cabeçote da máquina. Vale ressaltar que neste estudo foram utilizados dois corpos de prova para o ensaio com controle por alta taxa de deformação.

A Figura 43(a) e (b) mostram o perfil da curva tensão x deformação do alumínio.



Figura 43(a) – Perfil das curvas tensão x deformação do alumínio para diferentes níveis de taxa de deformação. Fonte: (Nóbrega, 2009)



Figura 43 (b) – Perfil das curvas tensão x deformação do alumínio para diferentes níveis de controle de velocidade. Fonte: (Nóbrega, 2009)

A Figura 44(a) e (b) mostram o perfil da curva tensão x deformação do latão.



Figura 44(a) e (b) – Perfil das curvas tensão x deformação do latão para diferentes níveis de taxa de deformação e velocidades de ensaio. Fonte: (Nóbrega, 2009).

De acordo com o exposto, a Tabela 9 mostra o grau de sensibilidade dos materiais testados em Nóbrega (2009) à taxa de deformação.

Materiais	Tipo de Controle do Ensaio de Tração			
	Taxa de Deformação	Velocidade do Cabeçote		
SAE 1020	Variação significativa	Pouca variação		
SAE 4340	Variação significativa	Não apresenta variações significativas		
Inox 304	Variação significativa	Pouca variação		
Alumínio	Pouca variação	Não apresenta variações significativas		
Latão	Não apresenta variações significativas	Não apresenta variações significativas		
Tabala 0 Grau da	concibilidado do alguno motoriaio à	taxa da dafarmação a à variação		

Tabela 9 – Grau de sensibilidade de alguns materiais a taxa de deformação e a variação de velocidade no ensaio de tração.

3.2 Especificação do Dispositivo de Impacto

O carregamento dinâmico da estrutura será fornecido por uma máquina de queda livre de peso (*drop weight machine*) bastante utilizada na avaliação do comportamento mecânico de materiais na indústria. Para utilização desta máquina foi necessário uma adaptação no dispositivo de fixação da estrutura a ser testada.

A Figura 45 mostra a máquina de queda de peso e um esquema de teste de impacto a ser realizado.



Figura 45 – Máquina de queda de peso utilizada no impacto do "U" e esquema do teste.

A máquina é constituída por uma massa de aço de 48,3 kg, ilustrada na Figura 46, com um cutelo de aço endurecido de superfície cilíndrica de raio igual a 25,4 mm na parte que colidirá com a estrutura em "U". A massa cai livremente através de sua montagem em colunas guias que tem como finalidade assegurar o movimento puramente vertical durante a queda conforme Figura 45.

Para içamento da massa após a queda, a máquina de queda de peso dispõe de garras anexadas às colunas guias e um cabo de aço que através de dispositivo imantado também permite o movimento de queda, mostrado na Figura 47(a).

Para o ajuste da altura de queda da massa, existe ao lado das colunas guias uma escala graduada de 2,10m, conforme ilustra Figura 47(b).



Figura 46 - Massa de 48,3 kg e colunas guias da máquina de queda de peso. Fonte: Nuclep S.A



Figura 47(a) e (b). Dispositivo de liberação / içamento da massa. Escala graduada em centímetros. Fonte: Nuclep S.A

A montagem da estrutura de teste na máquina de queda de peso é feita em uma base construída em aço fixada diretamente no corpo da máquina através de furos e parafusos. E todo seu acionamento é feito por um motor elétrico de 440 V. Na Figura 48 e 49 estão, respectivamente, o desenho da base com suas respectivas dimensões e o motor de acionamento.



Figura 48 – Base para montagem da estrutura em "U" . Fonte: Programa SolidWorks 2006.



Figura 49– Motor elétrico para acionamento da máquina de queda de peso. Fonte: NUCLEP S.A

A seguir se descreve os procedimentos para análise experimental e numérica, de um carregamento dinâmico.

3.3 Especificação do Sistema de Instrumentação / Medição

A seguir encontra-se a descrição dos elementos utilizados para a obtenção das deformações das estruturas submetidas ao impacto pela máquina de queda de peso.

- Extensômetro do tipo resistência elétrica, modelo **YFLA-5**, 120Ω, fabricante **Tokyo Seiki**®.

- Cola Epoxi 10 minutos, fabricante Araldite®. Normalmente a cola utilizada para fixação de extensômetro na superfície de teste é o Cianocrilato, porém esta não foi utilizada neste trabalho por não resistir ao impacto provocando assim a descolagem do extensômetro.

- Lixa d' água n.º 120 para preparação da superfície da estrutura de teste a receber o extensômetro, algodão e acetona para limpeza da mesma.

 Terminais para cabeamentos dos conectores do extensômetros e dos fios que serão ligados ao sistema de medição.

 Sistema de aquisição modular de dados com 32 canais, modelo ADS 2000, fabricante Lynx Tecnologia Eletrônica LTDA. responsável pela captura das medições do extensômetro.

 Micro computador com os programas AQDados e AQDAnalysis, fabricante Lynx Tecnologia Eletrônica LTDA responsáveis pelo controle e configuração do sistema aquisição, gravação, leitura dos dados, visualização e processamento dos dados.

3.4 Procedimento de Análise

O procedimento experimental compreende as seguintes etapas:

- 1. Dimensionamento dos perfis necessários à fabricação das estruturas;
- 2. Conformação e montagem dos perfis;
- 3. Escolha do local a ser impactado e lixamento da sua superfície para colagem dos extensômetros;
- 4. Espera do tempo de cura da cola epóxi;
- 5. Operação de soldagem para união dos conectores aos extensômetros;

- Cabeamento dos extensômetros para ligação dos mesmos ao sistema de aquisição de sinais através de operação de soldagem;
- 7. Verificação da qualidade do cabeamento dos extensômetros, medindo o valor da resistência do sistema com o multímetro;
- 8. Montagem da estrutura para impacto;
- 9. Ligação dos cabos do extensômetro ao sistema de aquisição de dados;
- 10. Balanceamento e calibração dos extensômetros utilizando programa de aquisição de dados;
- 11. Ajuste da altura da massa da Drop Weight;
- 12. Início de gravação dos registros do ensaio;
- 13. Liberação da massa da Drop Weight;
- 14. Interrupção da gravação dos registros do ensaio; e
- Processamento dos dados gravados utilizando o programa AqDAnalysis
 7.0 com a finalidade de se gerar resultados mais adequados a análises posteriores.

O procedimento numérico consiste das seguintes etapas:

- 1. Criação de um modelo geométrico em três dimensões da estrutura;
- 2. Definição do tipo de análise a ser realizada, estática ou dinâmica;
- Definição do material da estrutura com suas propriedades mecânicas, assim como o modelo constitutivo adotado;
- Definição de parâmetros associados ao carregamento, como ponto de aplicação e valor do carregamento para caso estático, ou velocidade de impacto para casos de colisão entre estruturas;
- 5. Processo de discretização da estrutura (geração de malha); e
- 6. Execução da análise.

E finalmente deve-se proceder a comparação de resultados das análises numéricas e experimental com análise analítica.

3.5 Análise da Estrutura "L"

A estrutura "L" foi utilizada com a finalidade de verificar o grau de aproximação entre os métodos analítico, numérico e experimental. Neste caso não foi realizada análise dinâmica. A estrutura "L" foi construída a partir de barras cilíndricas maciças que foram conformadas mecanicamente por uma curvadora manual de tubos. As dimensões finais da estrutura são altura (b) de 200 mm, comprimento da extremidade livre (c) de 170 mm e diâmetro igual a 5/8" (15,875mm). A Figura 50 ilustra de forma esquemática a estrutura mencionada e o equipamento usado na sua fabricação.



Figura 50 – Esquema de um pórtico em "L". - Fonte: (Gere, 2003). Curvadora manual para conformação mecânica das barras. Fonte: CEFET-RJ.

É conveniente verificar a aproximação entre os resultados obtidos pelo método analítico e numérico com o experimental. Por isso decidiu-se fazer esta verificação com base nos estudos feitos com estrutura em "L", por se tratar de uma estrutura mais simples. O procedimento compreende as seguintes etapas:

- Obtenção do deslocamento sofrido pela extremidade livre do "L" a partir da teoria básica envolvida no sistema físico (método analítico), da análise experimental e numérica;
- 2. Comparar os valores da análise numérica e experimental com o valor obtido do cálculo analítico.

A teoria envolvida na análise estática de uma estrutura está relacionada com o estudo de deflexão de vigas da resistência de materiais segundo Gere (2003). Deflexão é o deslocamento horizontal e/ou vertical sofrido por um ponto da viga quando submetida a carregamento, que depende das dimensões e da rigidez da viga. Para o pórtico "L" de alumínio, a deflexão estática (δ) é encontrada através da seguinte expressão

$$\delta = \frac{Pc^2(3b+c)}{3EI}$$

na qual

P – Carga estática [N];

b – altura do pórtico [mm];

c – comprimento da extremidade livre do pórtico [mm];

E – Módulo de elasticidade do alumínio [MPa]; e

I – Momento de Inércia [mm⁴] definido para seção circular pela seguinte expressão:

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi \times (15,875)^4}{64} = 3117,64mm^4$$

O módulo de elasticidade (E) do alumínio utilizado para cálculo da deflexão estática é o encontrado na maioria da literatura técnica que segundo Gere (2003) possui o valor de 70 GPa.

O carregamento estático consiste na atuação da força gravitacional sob a massa. Assim o valor da carga estática P = mg

$$P = mg$$

na qual,

m – massa da *Drop Weight* = 48,3 kg; e g – aceleração da gravidade = 9,81 m/s².

A partir do exposto acima é possível calcular o deslocamento vertical da extremidade livre da viga com carregamento estático.

O procedimento numérico para análise da estrutura realizou-se por elementos finitos e compreende as seguintes etapas:

- 1- Criação de modelo geométrico;
- 2- Definição do tipo de análise a ser realizada. Neste caso a análise é estática;
- 3- Definição do material da estrutura com suas propriedades mecânicas, assim como o modelo constitutivo adotado;

- 4- Ajuste do carregamento e das condições de restrição da estrutura;
- 5- Processo de discretização da estrutura (geração de malha); e
- 6- Execução da análise para obtenção do valor do deslocamento da extremidade livre da estrutura em "L".

A Figura 51 representa o modelo da estrutura em "L" discretizada utilizado na simulação assim como a mesma após o carregamento.



Figura 51 – Estrutura discretizada e submetida a carregamento estático. Fonte: *CosmosWorks* Advanced Professional, 2006.

O procedimento experimental para carregamento estático da estrutura consiste nas seguintes etapas:

1- Montagem da estrutura na máquina Drop Weight;

2- Ajuste da massa para a mesma fique faceada a extremidade livre da estrutura (aba do "L");

3- Verificação da altura da extremidade livre antes do carregamento;

4- Acionamento de dispositivo para desarme da garra magnética, liberando assim a massa para carregamento; e

5- Verificação da altura da extremidade livre após o carregamento;

A Figura 52 representa esquematicamente a aplicação da carga estática e a estrutura real montada na *Drop Weight*.



Figura 52- Esquema do carregamento estático no "L".Fonte: (Gere, 2003) e Nuclep S/A.

A partir da teoria da resistência de materiais básica mencionada no capítulo anterior, verifica-se que a deflexão vertical da extremidade livre do pórtico em "L" é δ = 16,01 mm. A partir da simulação em CosmosWorks verifica-se que a deflexão da estrutura é 15,05 mm.

Pelo experimento com carga estática aplicada pela massa da Drop Weight e através de medição por uma escala tem-se que a deflexão vertical sofrida pelo estrutura é 14,30 mm.

Os resultados obtidos para a análise estática tanto para o método analítico e numérico (elementos finitos), seguidos dos percentuais de erro em relação ao método experimental, encontram-se na Tabela 10.

Ensaio Estático	Deflexão vertical (mm)	Erro (%)
Analítica	16,01 mm	11,95
Elementos Finitos	15,15 mm	5,95
Experimental	14,30 mm	-

Tabela 10 – Comparação de resultados de deflexão estática entre os métodos analítico, numérico e experimental.

3.6 Análise da Estrutura "U"

A análise dinâmica da estrutura em "U" foi realizada pelo método experimental e numérico. O perfil estrutural para a estrutura em "U" foi o mesmo utilizado na construção da estrutura em "L", isto é, barras cilíndricas maciças que

também foram conformadas por uma curvadora manual de tubos. A Figura 53 mostra a estrutura com suas dimensões finais.



Figura 53 – Dimensões da estrutura em "U". Fonte: Programa *CosmosWorks Advanced Professional 2006.*

Para realização dos testes de impacto, adotaram-se três alturas distintas para a massa da *Drop Weight* e por motivos associados à preservação das instalações físicas, a altura máxima de queda da massa da *Drop Weight* foi 1,5m. Desta forma as alturas de queda foram: 0,7m, 1m e 1,5m.

O preparo da estrutura em "U" para ensaio dinâmico inclui resumidamente a escolha do local a ser impactado pela massa da *Drop Weight* e instrumentação do mesmo com extensômetro. A Figura 54 mostra a estrutura já instrumentada.



Figura 54 – Pórtico em "U" instrumentado com extensômetro. Fonte: PUC-RJ.

O procedimento experimental para carregamento dinâmico da estrutura em "U" consiste nas seguintes etapas:

- Montagem da estrutura instrumentada na máquina *Drop Weight* e ligação dos cabos e balanceamento do extensômetro ao sistema de aquisição de dados;
- 2- Balanceamento dos extensômetros utilizando programa AQDados;
- 3- Ajuste da altura da massa da Drop Weight; e
- 4- Início dos testes.

Uma das maiores dificuldades nesta análise foi determinar o valor da carga dinâmica e a duração da mesma para caracterizar o impacto. Como a carga dinâmica depende da altura de queda a dúvida resume-se a qual altura é suficiente para se provocar um carregamento com taxa de deformação associada a ensaio dinâmico e posteriormente com alguma colisão veicular. Para determinação da altura, realizou-se um impacto da massa de 48,3 kg, posicionada a uma altura de 70 cm na estrutura "U". A Figura 55 mostra a estrutura após o impacto.



Figura 55 – Estrutura deformada após colisão com massa de 48,3kg.

Por conservação de energia tem-se a velocidade de impacto através da seguinte expressão:

$$EM_{antes} = EM_{depois}$$
$$mgh = \frac{mV_0^2}{2}$$

na qual:

m = massa de impacto [kg];

g = aceleração da gravidade $[m/s^2]$;

h = altura de queda [m];

 V_0 = velocidade de impacto [m/s].

Assim tem-se $V_0 = \sqrt{2gh} = 3.7 \text{ m/s} = 13.32 \text{ km/h}.$

Como a velocidade de impacto obtida é menor que 10 m/s, pode-se concluir que o ensaio realizado é de impacto de baixa velocidade, conforme Jones (1997). É conveniente saber qual a taxa de deformação obtida com a altura de queda adotada.

A partir do ajuste linear da curva deformação x tempo obtida no experimento pelo Método dos Mínimos Quadrados, se obtém a taxa de deformação e também a qualidade do ajuste dado pelo valor de R^2 . O ajuste deve ser realizado na porção da curva correspondente a resposta da estrutura ao carregamento de impacto. Adicionando-se uma linha de tendência, gera-se uma reta bem próxima a curva selecionada, obtendo-se assim uma equação linear da forma Ax + B e o valor de R^2 . Para uma boa qualidade de ajuste deve-se ter valor de R^2 próximo a unidade.

Abaixo seguem as etapas para um ajuste linear utilizando o programa Excel.

- 1. Análise da região da curva deformação x tempo obtida no experimento.
- 2. Seleção da curva associada à resposta da estrutura ao carregamento dinâmico para confecção de uma nova linha de tendência.
- Adicionar linha de tendência à curva selecionada optando por mostrar a equação desta linha juntamente com o valor R².

A Figura 56 mostra a sequência para o ajuste linear mencionado utilizando o programa Excel.





Passo 2







Figura 56 - Etapas para o ajuste linear de uma curva utilizando o programa Excel.

Vale ressaltar que no primeiro passo o último ponto de medição registrado pelo extensômetro corresponde a uma deformação de aproximadamente 17%. A partir deste ponto a medição não é confiável devido à ruptura do circuito do extensômetro. A taxa de aquisição utilizada neste trabalho foi de 2000 Hz.

Analisando o ajuste linear para a curva deformação x tempo registrada no ensaio, verifica-se que a taxa de deformação do ensaio para a altura de 70 cm foi de aproximadamente 1066s⁻¹. Com esta taxa pode-se concluir que a altura inicial adotada para o teste de impacto da estrutura em "U" permite carregamentos associados à dinâmica baixa, segundo Meyers (1994).

Para se ter uma estimativa da duração do impacto partiu-se de um impacto de um martelo manualmente sobre uma barra, de seção transversal retangular, engastada devidamente instrumentada com extensômetro e ligada a um aparelho de aquisição de sinais. A Figura 57 ilustra a barra ensaiada e o esquema do teste realizado.



Figura 57 – Esquema de teste usado para estimativa da duração do impacto.

Segue na Figura 58 o registro da deformação no tempo da barra obtido pelo aquisitor de sinais, através da qual se pode verificar que a resposta da estrutura inicia-se em aproximadamente 3,367s e termina em 3,375s, fornecendo uma estimativa da duração da resposta ao impacto da estrutura de 0,008s.



Figura 58 – Sinal registrado pelo aquisitor de sinais. Fonte: AqDAnalysis 7.0.

Como a massa de impacto a ser utilizada no teste da estrutura em "U" será muito maior considerou-se que o impacto terá uma duração menor e a partir daí

para as simulações com elementos finitos adotou-se uma duração de impacto igual a 0,02s.

A partir da estrutura deformada resultante do ensaio de impacto inicial (com altura de queda igual a 70 cm) pôde-se fazer uma comparação com estrutura deformada obtida pelo método de elementos finitos feito pelo *CosmosWorks Advanced Professional 2006*.

Como não se tem estimativa do carregamento dinâmico produzido pela massa de impacto da *Drop Weight*, decidiu-se realizar várias simulações variandose apenas o valor de carga com o objetivo de se comparar as estruturas deformadas obtidas nas simulações com a estrutura deformada no ensaio de impacto inicial (altura de queda igual a 70 cm). A partir deste procedimento determinou-se que o valor do carregamento dinâmico estimado atuante na estrutura é igual a 9000N.

O ensaio de tração realizado em um corpo de prova de alumínio cuja a curva tensão x deformação convencional está ilustrada na Figura 33 forneceu os dados de entrada necessários a simulação. A Figura 59 ilustra a tela de especificação do material do programa de simulação utilizado.

0.0. 0.0.0.0	Properties	Tables 8	Curves			
Use Solidworks material	Material F	Propertie	\$			
 Custom defined Centor library Launch 	Model T	ype:	Plasticity - von	Mises 👔	ln 🗌	clude creep effect
From library files	Units:		SI [~		
cosmos materials	Categor	y:	aluminum		Edi	t Stress-Strain curve
	Name:		User Defined			
Aluminium Alloys (85 Gopper Alloys (19)	Property	Descr	iption	Value	Units	Temp Dependency
🕀 🖪 Titanium Alloys (SS)	EX	Elastic	city modulus (1 st)	6.9000001e+010	N/m^2	Constant
🕀 🖪 Zinc Alloys (4)	NUXY	Poisso	on's ratio in XY dii	0.33	NA	Constant
😟 🖪 Other Alloys (3)	SIGYLD	Yield :	stress	3.4656e+008	N/m^2	Constant
😟 🖪 Plastics (19)	ETAN	Tange	ent modulus		N/m^2	Constant
😟 🖪 Other Metals (11)	ALPX	Coeff.	of thermal expan	2.4e-005	/Kelvin	Constant
🕀 🖪 Other Non-metals (E	DENS	Mass	Density	2700	kg/m^3	Constant
	RK	Harde	ning factor (0.0-1	0.85	NA	Constant

Figura 59 – Dados de entrada utilizados pelo programa. Fonte: Programa *CosmosWorks Advanced Professional 2006.*

A partir da Figura 59 verifica-se que também são necessários alguns pontos da fase plástica da curva tensão deformação verdadeira. O par ordenado tensão e deformação verdadeira também foram obtidos a partir dos valores da curva tensão x deformação convencional com as seguintes equações, respectivamente:

$$\sigma_v = \sigma(1+\varepsilon)$$

na qual,

 σ_v = tensão verdadeira [MPa];

 σ = tensão convencional [MPa]; e

 ε = deformação convencional [adimensional].

e

$$\mathcal{E}_{v} = \ln(1 + \mathcal{E})$$

na qual,

 ε_v = deformação verdadeira [adimensional] e

 ε = deformação convencional [adimensional].

A Figura 60 ilustra o par ordenado ($\sigma_v; \varepsilon_v$) inserido para especificação da curva tensão x deformação verdadeira especificada necessária a simulação do carregamento não linear sobre a estrutura.

elect material source Use SolidWorks material Custom defined Centor library From library files Common materials	Properties Tat Type Type: Note: True s required for	oles & Curves Stress-Strain curve stress-strain curve d large strain formulat	lata is ion.	
 Iron (3) Steel (30) Copper Alloys (85) Titanium Alloys (55) Zinc Alloys (4) Other Alloys (3) Plastics (19) Other Metals (11) Other Non-metals (5) 	Points N Points Str 1 0.0 2 0.0 3 0.0 4 0.0 5 0.0 6 0.0	I/A ▼ ain (N/A) 10531 10554 10611 10637 10738 10756	N/m ² Stress (N/m ²) 3.4656e+008 3.4956e+008 3.4936e+008 3.4936e+008 3.4936e+008 3.5035e+008	File View Delete
Hern Metals (11) Other Non-metals (5			icel Save	

Figura 60 – Curva tensão x deformação verdadeira utilizados na simulação. Fonte: Programa *CosmosWorks Advanced Professional 2006*.

O carregamento sobre a estrutura não linear, já que se está lidando com impacto, é configurado em função do tempo através de um gráfico F x t, ilustrado na Figura 61. Os dados estimados foram força igual a 9000N com duração de 0,02s.

As restrições impostas à estrutura refletem a situação real de montagem na máquina *Drop Weight*. Como a estrutura está engastada em dois pontos da base, o programa denomina este tipo de restrição como restrição fixa.



Figura 61 – Duração e Amplitude de impacto. Fonte: Programa *CosmosWorks Advanced Professional 2006.*

No processo de geração da malha, o programa CosmosWorks faz uma análise do volume da estrutura e informa o tamanho ideal do elemento de malha a ser usado. O tamanho indicado foi de 4,5 mm, porém visando uma melhor qualidade nos resultados utilizou-se uma malha compostas de elementos sólidos tetraédricos lineares de 4 mm com tolerância igual a 0,1 mm. A Figura 62 mostra a estrutura contínua já discretizada com a malha aplicada.



Figura 62 – Pórtico discretizado por elementos finitos. Fonte: Programa *CosmosWorks Advanced Professional* 2006.

Pela conservação da quantidade de movimento tem-se que impulso (I) causa a variação da quantidade de movimento (mv). Sendo assim, tem-se:

$$F = m \frac{dv}{dt}$$
$$F dt = m dv$$

Como o Impulso (I) é a integral da força aplicada em um intervalo de tempo, tem-se $I = \int F dt = m \times \Delta v$

A equação acima é representada aproximadamente por $F\Delta t = m\Delta v$. Assim como se tem o carregamento, F = 9000N, pode-se obter a altura h de queda correspondente. Desta forma:

 $F \times \Delta t = m \times \sqrt{2gh}$ $9000 \times 0.02 = 48.3 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times h}$

h = 0,70m

Com os resultados da simulação verifica-se que a estrutura deformada é bem próxima da estrutura obtida com o teste de impacto inicial na máquina de queda de peso. Com o carregamento transversal proporcionado observa-se uma deformação localizada do tipo flambagem global conforme mencionado no Capítulo 2. Na Figura 63 pode-se verificar que o comentário acima procede.



Figura 63 – Deflexão vertical sofrido pelo ponto médio pela estrutura. Fonte: Programa *CosmosWorks Advanced Professional 2006.*

Um dos interesses nesta análise é a determinação do valor do carregamento no instante do impacto de modo a se estabelecer a energia de deformação absorvida pela estrutura. Verificou-se que com as simulações feitas pelo Cosmos Works, não seria possível obter esta informação, pois este dado é um valor de entrada para início da análise e como foi mencionado anteriormente, o valor do carregamento não é conhecido, pois, este é variável no tempo. Então se decidiu realizar as análises com o LS-Dyna que é um programa mais adequado para tal finalidade.