

ROBERTO EIKI OSHIRO
SÉRGIO SEIJI TERAMOTO

9,0
(note, zero)
19/12/01

ESTUDO DE IMPACTO EM PERFIS ABERTOS

**Trabalho de Formatura apresentado
para a Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo**

São Paulo

2001

ROBERTO EIKI OSHIRO
SÉRGIO SEIJI TERAMOTO

ESTUDO DE IMPACTO EM PERFIS ABERTOS

**Trabalho de Formatura apresentado
para a Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo**

**Área de concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador:
PhD
Marcílio Alves**

São Paulo

2001

FICHA CATALOGRÁFICA

Oshiro, Roberto Eiki

Teramoto, Sérgio Seiji

Estudo feito do impacto em peças de perfil aberto através de simulações numéricas. São Paulo, 2001.

78p.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Impacto 2.Mecânica dos Sólidos

I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos colegas da Escola Politécnica da USP e à todos os integrantes do Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas que colaboraram para a realização deste trabalho.

Agradecemos em especial ao nosso orientador Marcilio Alves pela atenção e disponibilização dos recursos necessários, e aos nossos familiares, namoradas e amigos pelo apoio recebido.

Os autores

RESUMO

Neste trabalho o objetivo é o estudo de impacto em perfis abertos através de modelagem matemática (Elementos Finitos) do fenômeno. A peça estudada foi montada e simulada através do software Abaqus versão 6.2.1. Por recomendação do orientador o trabalho foi dividido em duas partes: na primeira foi feito um estudo do comportamento da peça com a energia total constante e depois com a massa constante. Como resultados obteve-se uma variação grande dos perfis finais das peças demonstrando que não há uma única faixa de transição, pelo menos na faixa de valores estudados. Na segunda parte do trabalho foi aplicada a teoria dos Pi de Buckingham, obtendo dessa forma, os adimensionais para o sistema e usando-se então as teorias clássicas de similaridade foram verificadas as influências da espessura e da taxa de deformação. Como conclusão a espessura mostrou influência no fenômeno alterando a Similaridade entre modelo e protótipo, logo os adimensionais compostos pela espessura mostram-se relevantes para o fenômeno. A taxa de deformação também altera a semelhança se for considerada no modelo de simulação.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1– OBJETIVOS	1
2– INTRODUÇÃO	2
2.1 – Absorvedores de energia	2
2.2 – Flambagem	9
2.3 – Importância do perfil estudado	11
3 – ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO PERFIL SOB IMPACTO	12
3.1 – Introdução	12
3.2 – Detalhes da simulação	17
3.3 – Resultados	20
3.3.1 – Relação entre as etapas do fenômeno e a curva de energia	20
3.3.2 – Resultados da simulação para massa constante e velocidade variável	28
3.3.3 – Resultado da simulação para energia constante	30
4 – LEIS DE SIMILARIDADE NO FENÔMENO DE IMPACTO	32
4.1 – Introdução	32
4.2 – Teorema dos Pi de Buckingham	33
4.3 – Semelhança	34
4.4 – Análise no caso de peças de perfil aberto	36
4.4.1 – Obtenção dos números adimensionais	36
4.4.2 – Análise da relação dos parâmetros básicos	38
4.4.2 – Análise dos adimensionais obtidos	43
4.5 – Detalhes da simulação	46
4.6 – Resultados	47
4.6.1 – Verificação do efeito da espessura na Similaridade	47
4.6.2 – Verificação do efeito da velocidade na Similaridade	51
4.6.3 – Verificação do efeito da taxa de deformação na Similaridade	53
5 – DISCUSSÃO	57
6 – CONCLUSÕES	59
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

8 – ANEXOS.....	61
8.1 – Anexo A programação	61
8.2 – Anexo B informações do sistema.....	66

LISTA DE TABELAS

tabela 1 – grupos dimensionais.....	36
tabela 2 – resumo das relações entre modelo e protótipo	42
tabela 3 – dados para as simulações de similaridade	46

LISTA DE FIGURAS

figura 1 – perfil da peça estudada.....	1
figura 2 – estrutura sob carga estática.....	6
figura 3 – (a) distribuição de forças características no carregamento estático.....	7
figura 3 – (b) desenvolvimento de dobras durante o carregamento axial.....	7
figura 4 – peça antes da aplicação de carga e formato final com formação de dobras e completo esmagamento.....	6
figura 5 – formação de dobras axissimétricas.....	8
figura 6 – formação de dobras não-simétricas.....	8
figura 7 – placa com uma carga aplicada no plano.....	9
figura 8 – (a) 1º modo de flambagem da estrutura.....	10
figura 8 – (b) 2º modo de flambagem da estrutura.....	10
figura 9 – (a) flambagem plástica dinâmica.....	12
figura 9 – (b) flambagem dinâmica progressiva.....	12
figura 10 – regiões de tipos de impacto observadas em peças cilíndricas.....	13
figura 11 – modelo usado nas simulações.....	18
figura 12 – resultado do ensaio estático de tração.....	19
figura 13 – (a) curvas de energia do sistema em função do tempo.....	20
figura 13 – (b) etapas de flambagem da peça.....	21 e 22
figura 13 – (c) formato final da peça.....	22
figura 14 – (a) curvas de energia do sistema em função do tempo.....	23
figura 14 – (b) etapas de flambagem da peça.....	24 e 25
figura 14 – (c) formato final da peça.....	26
figura 15 – formatos finais obtidos para a massa constante.....	28 e 29

figura 16 – formatos finais obtidos com energia total constante e velocidades e massas variáveis.....	30
figura 17 – parâmetros da peça.....	36
figura 18 – seção transversal do protótipo	40
figura 19 – seção transversal do modelo.....	41
figura 20 – formato final para o fator de escala unitário.....	47
figura 21 – formato final para fator de escala $\frac{1}{2}$ e espessura não escalonada.....	48
figura 22 – formato final para fator de escala $\frac{1}{2}$ e espessura escalonada	48
figura 23 – (a) gráfico de energia para escala unitária.....	49
figura 23 – (b) gráfico de energia para escala $\frac{1}{2}$ e espessura escalonada	49
figura 24 – (a) formato final para escala unitária	51
figura 24 – (b) formato final para escala $\frac{1}{2}$	51
figura 25 – (a) gráfico de energia para escala unitária.....	52
figura 25 – (b) gráfico de energia para escala $\frac{1}{2}$	52
figura 26 – formato final considerando-se a taxa de deformação	53
figura 27 – formato final considerando-se a taxa de deformação e $\beta = 1$	54
figura 28 – formato final considerando-se a taxa de deformação e $\beta = \frac{1}{2}$	54
figura 29 – curva de energia para fator de escala unitário	56
figura 28 – curva de energia para fator de escala $\frac{1}{2}$	56

m	número de adimensionais necessários
n	número de parâmetros independentes
r	número de dimensões independentes necessárias para especificar os parâmetros q_i
β	fator de escala
y_c	posição da linha neutra
σ_d	tensão dinâmica de escoamento
$\dot{\varepsilon}$	taxa de deformação
D	constante do material na equação de Cowper-Symonds
q	constante do material na equação de Cowper-Symonds

1 – OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o estudo do impacto axial sobre estruturas através de simulações numéricas. A peça em questão é constituída de uma liga de alumínio e a geometria estudada tem o perfil aberto como a figura abaixo:

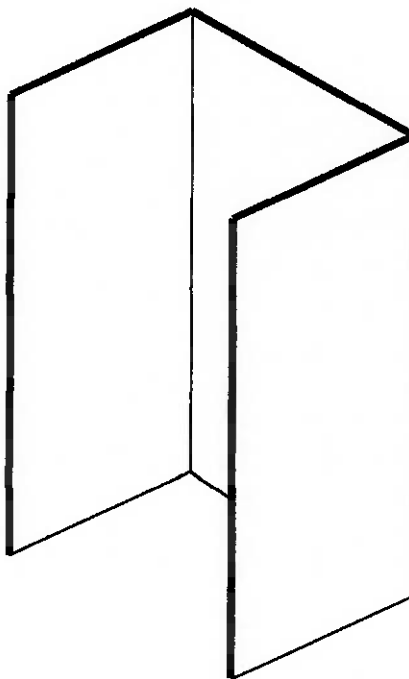


figura 1 – perfil da peça estudada

Por uma sugestão do orientador o trabalho foi dividido em duas partes: na primeira foi estudado o comportamento do perfil sob impacto, principalmente com variações da velocidade e das condições de contorno. Na outra, um estudo do efeito do fator de escala sobre o fenômeno de impacto foi feito com a finalidade de estudar a relação entre protótipo e modelo para este caso.

2 – INTRODUÇÃO

2.1 – Absorvedores de energia

Ao longo das últimas décadas o fenômeno de impacto em estruturas tem sido investigado em detalhes. Enquanto nas décadas de 60 e 70 a motivação principal estava relacionada com o desenvolvimento de tecnologias militares, atualmente é crescente a preocupação com o tema na área civil, com aplicações envolvendo estruturas automotivas e desastres ambientais.

A resposta não elástica de estruturas sobre carregamento elevado de impacto tem encontrado aplicações no projeto dos mais variados de sistemas de transportes. Veículos de passageiros, containers destinados a transporte de substâncias perigosas, barris com produtos nucleares, tubulações de plantas químicas e muitas outras estruturas são sujeitas atualmente a testes de impacto (“crash tests”) de modo a assegurar que elas estão de acordo com as normas de segurança estabelecidas por órgãos reguladores e pelo governo. Como é de se supor, os gastos com esses testes, apesar de necessários, são elevados, já que se tratam de ensaios destrutivos.

Para atender a esses requisitos de segurança e ao mesmo tempo minimizar os custos, novas alternativas começam a surgir. Dentro de algumas limitações, é possível a utilização de ferramentas numéricas para realizar análises complexas de impactos reais. Alguns resultados, como os apresentados na *ref.bib.[1]* demonstram a utilidade dessa ferramenta. Na indústria automobilística brasileira os métodos computacionais de elementos finitos também têm sido utilizados com maior frequência para a análise de casos de grandes deformações, mas os resultados, apesar de se mostrarem satisfatórios, pecam no que se refere a existência de conhecimento teórico aprofundado, necessário para a compreensão do fenômeno.

Deve-se frisar que as falhas de impacto estão incluídas dentro das falhas estruturais. Entretanto os casos de impacto estrutural possuem muitos aspectos que os distinguem da análise realizado dentro do campo da mecânica dos sólidos,

elasticidade e mesmo plasticidade. Existe sempre a necessidade de se conhecer as leis constitutivas do material, juntamente com o papel da taxa de deformação na tensão de escoamento e a interação entre as tensões generalizadas. Existem muitas técnicas de análise para se calcular a performance de estruturas básicas sob carregamento dinâmico. Deve-se frisar que as falhas de impacto estão incluídas dentro das falhas estruturais.

O fenômeno de impacto estrutural pode ser estudado iniciando por descrever algumas características que ocorrem em um impacto de baixa velocidade. Essa classe de evento de impacto, quando a velocidade de impacto é tipicamente menor que 20m/s (72km/h), é importante para muitos propósitos de aplicação prática, e a queda de uma massa em uma estrutura serve de exemplo. Imediatamente após o contato entre a massa de queda e a estrutura, deformações elásticas são dominantes devido à rápida propagação e ondas elásticas. Essas ondas interagem com a face de contorno do material, promovendo um complexo quadro de reflexão, atenuação e mudança de características da onda.

Essa primeira resposta no tempo da estrutura ocorre na faixa de microssegundos do evento inicial de impacto e necessita ser diferenciado da resposta que ocorre em um intervalo de tempo maior. Nesse último caso, o tempo total de duração do impacto é da ordem de milissegundos, muito maior que o período de propagação da onda elástica. Isso é o que permite desprezar a primeira fase do movimento em comparação com o tempo de propagação do que é denominado ondas plásticas.

O mecanismo de dissipação da energia de impacto leva à deformações da estrutura. Quando um componente estrutural é feito de um material dúctil, grandes quantidades de energia transmitidas durante o impacto podem causar sérias mudanças geométricas e, conseqüentemente, grandes deformações. Desse modo, o deslocamento finito (resistência e restrições) aumenta a tensão superficial, causando o “endurecimento” do componente. Então para uma dada energia de impacto, o deslocamento previsto de uma estrutura onde as forças superficiais não são consideradas acabam sendo maiores do que ocorreria na prática.

As relações cinemáticas e estáticas são independentes umas das outras, e estão unidas unicamente pelo comportamento do material da qual a estrutura é feita. A chamada Lei Constitutiva do Material ou Equação de Estado torna-se então de importância prioritária para conduzir à equação que governa o problema estrutural. Juntamente com as condições iniciais e de contorno, pode-se encontrar o caminho para uma solução mais completa.

A equação constitutiva é, em geral, obtida através de uma série de experimentos. Os dados experimentais são então utilizados para obter funções matemáticas e equações através do ajuste da curva obtida. Apesar de que esse procedimento possa soar pouco científico, o outro extremo, que seria o processo de estudo microestrutural e químico, ainda está em uma fase inicial.

No caso do impacto, o material precisa ser testado sob condições dinâmicas. Determina-se, então, como é que o nível de tensão é afetado pela deformação, pela taxa de deformação e, ocasionalmente, pela temperatura. Esses dados são a base para se obter a equação constitutiva que relaciona as equações de equilíbrio e geométrica do material.

Entretanto, empregar uma descrição detalhada do comportamento do material em uma análise é pouco usual. Dessa forma, costuma-se utilizar equações tensão-deformação simplificadas. Em particular, um material descrito por uma tensão de escoamento constante σ_0 , independentemente da deformação e de sua taxa de deformação, é chamada de rígido e perfeitamente plástico (rpp - rigid, perfectly plastic). Isso é uma simplificação razoavelmente aceitável para materiais dúcteis sujeitos a grandes deformações e dentro do conceito de tensão para engenharia (força dividida pela área inicial). Em uma estrutura idealizada como rpp não existem deformações elásticas. A estrutura mantém o carregamento sem sofrer nenhuma deformação, até que o nível de tensão alcance a tensão de escoamento.

Os elementos tubulares de parede fina são utilizados amplamente como absorvedores de impacto (longarinas de veículos, guard rails, plataformas, etc.). Compreender a

característica da resposta dinâmica dos elementos tubulares é de extrema importância para estimar a energia que eles são capazes de absorver. Quando sujeito a um carregamento estático axial (*fig. 2*) a distribuição das forças apresenta características semelhantes à *fig. 3 (a)*. Podemos reparar que ocorre um comportamento regular e repetitivo da curva de carregamento-deslocamento. Cada pico está associado com a formação de uma dobra, como representado na *fig. 3 (b)*. Dependendo da relação entre o raio do tubo e a espessura da parede, podemos ter a formação de dobras axissimétricas como da *fig. 5* ou então apresentar dobras não-axissimétricas em forma de diamante como da *fig. 6*. Ainda, na *fig. 4*, pode-se observar uma peça completamente esmagada, absorvendo dessa maneira, a maior quantidade de energia possível.

Outro elemento que possui utilização como absorvedor de impacto são os de seção retangular. Entretanto poucos autores têm explorado a utilização de elementos de seção de perfil aberto. O estudo de seu comportamento dinâmico poderia conduzir a um aumento do conhecimento das características da transferência de energia durante o fenômeno de impacto.

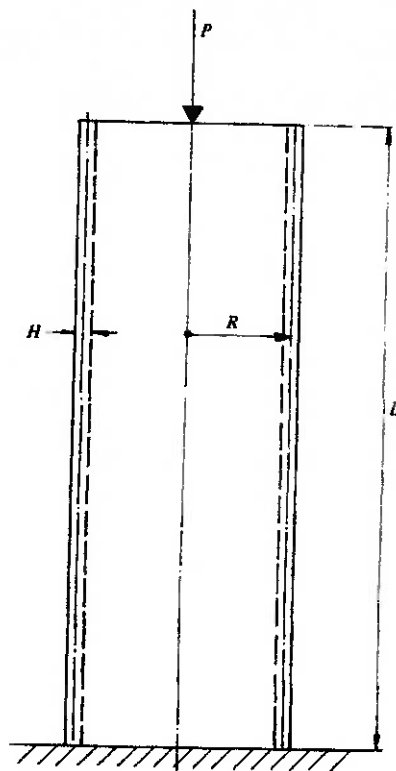
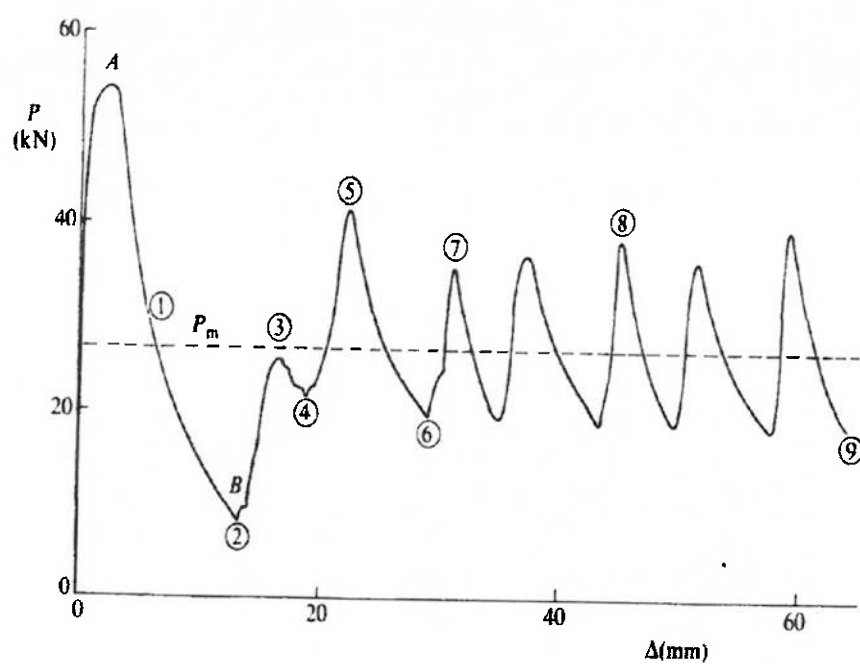


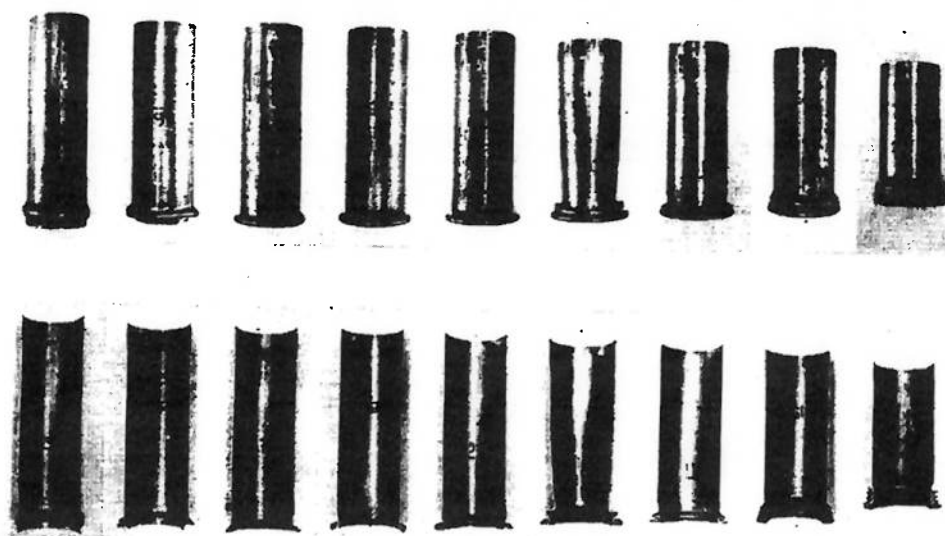
figura 2 – estrutura sob carga estática



figura 4 – peça antes da aplicação da carga e formato final com formação de dobras e completo esmagamento



(a)



(b)

figura 3 – (a) distribuição de forças características no carretamento estático; (b) desenvolvimento de dobras durante o carregamento axial

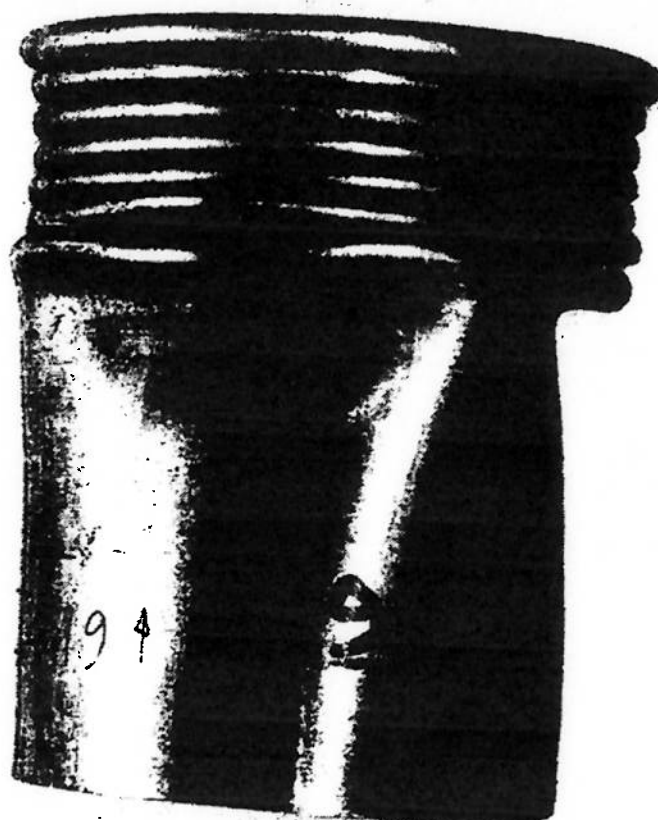


figura 5 – formação de dobras axissimétricas

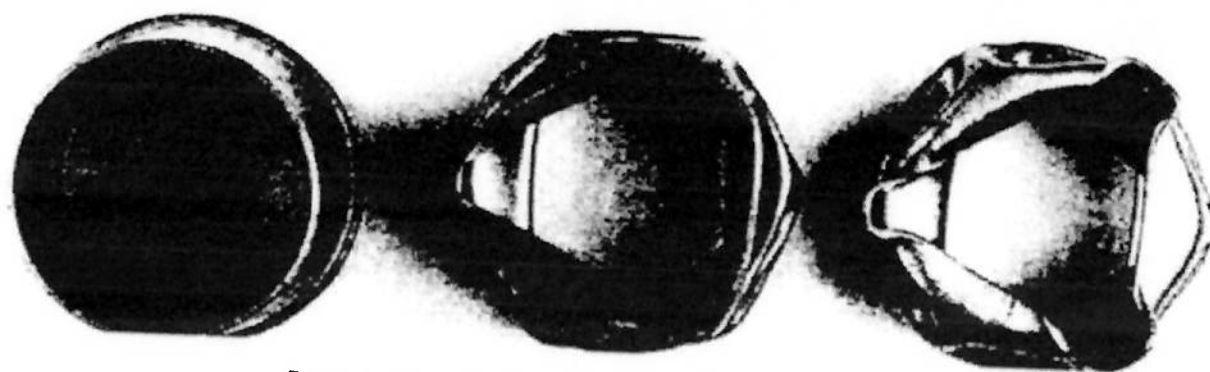


figura 6 – formação de dobras não-axissimétricas

2.2 – Flambagem

Para o estudo do impacto que será feito neste trabalho é necessário o entendimento de um importante fenômeno que se desenvolve na peça que é a flambagem.

Flambagem é o fenômeno observado quando a peça colapsa devido a uma carga axial pura, necessariamente compressão. Isso é observado somente em peças de comprimento (na direção da aplicação da carga) muito maior do que as dimensões da seção e quando o valor de carga aplicada atingir um determinado valor crítico. Esse valor crítico depende da geometria da peça, das características materiais e das condições de contorno das extremidades. A figura a seguir demonstra uma placa flambando:



figura 7 – placa com uma carga aplicada no plano

Existem também diversos modos de flambagem de uma peça, ou seja, a peça pode flambar de diversas maneiras quando a carga aplicada atinge o 1º valor crítico, o 2º valor crítico e assim por diante. A figura abaixo demonstra dois modos de flambagem possíveis:

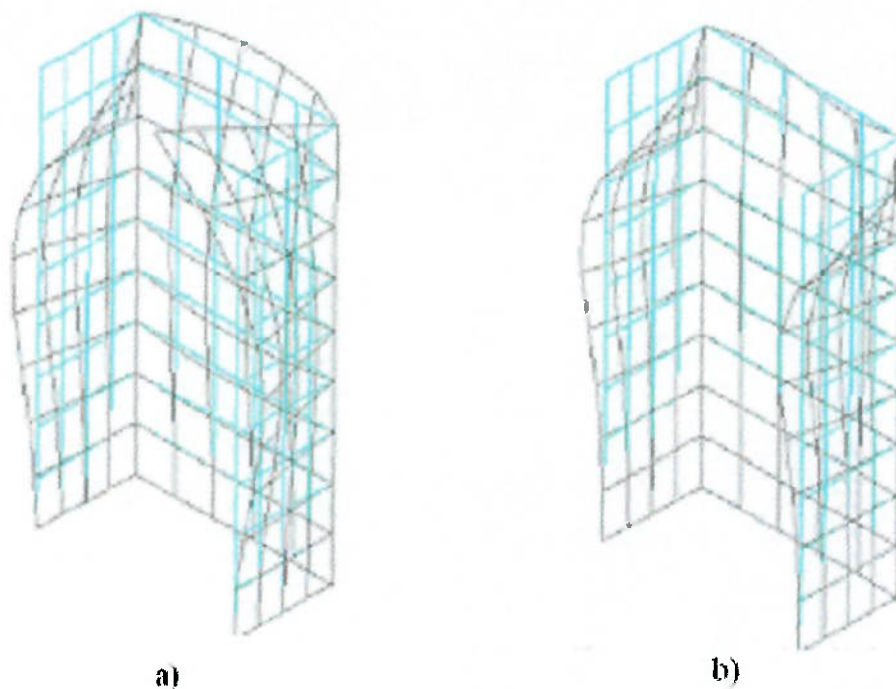


figura 8 – (a) 1º modo de flambagem da estrutura, neste caso a peça flambou de maneira simétrica; (b) 2º modo de flambagem da estrutura, neste caso a peça flambou de maneira anti-simétrica

A determinação desses valores críticos constitui-se em um problema de auto-valores, ou seja, solucionar uma equação do tipo:

$$K * v = 0$$

onde K é a matriz de rigidez tangente quando os carregamentos são aplicados e v são soluções não triviais de deslocamentos.

Fato que deve ser observado é que dentro do regime elástico a carga crítica não depende da resistência do material, sendo o módulo de Young o único fator material que influencia no valor da carga. Por isso estruturas geometricamente iguais, sendo uma feita de material de alta resistência e outra de material de menor resistência mecânica, colapsam com a mesma força aplicada.

Para encontrar as cargas críticas no perfil a ser estudado será necessário o uso de ferramentas de cálculo, já que analiticamente torna-se muito complicado a sua

determinação. A importância do cálculo desses modos é que eles serão usados para o desenvolvimento do estudo de impactos nesse perfil.

2.3 – Importância do perfil estudado

Atualmente a estrutura dos veículos é construída de maneira a absorver parte da energia do impacto, fazendo dessa maneira que menos energia seja transmitida ao passageiro, ou seja, dando-lhe maior segurança. Neste caso, o colapso axial de tubos é um dos mecanismos básicos usados para absorção e estes devem sempre colapsar de forma progressiva e controlada para não causar danos ao passageiro e/ou carga.

Para veículos de passeio os perfis fechados são mais utilizados como absorvedores de impacto. No entanto, em chassis de caminhões e ônibus é comum encontrar longarinas com perfis que se aproximam do perfil a ser estudado.

Como visto anteriormente, o comportamento de perfis abertos sob impacto ainda não foi muito bem estudado, justificando dessa maneira este trabalho.

3 – ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO PERFIL SOB IMPACTO

3.1 – Introdução

Há vários fenômenos possíveis que podem se desenvolver durante o impacto para a estrutura a ser estudada. A forma final da peça depende das características dinâmicas da carga aplicada, da massa da carga, das propriedades materiais e geométricas da chapa, assim como o modo de fixação da mesma. As figuras a seguir demonstram duas peças de perfil cilíndrico que se deformam de maneira diferente:

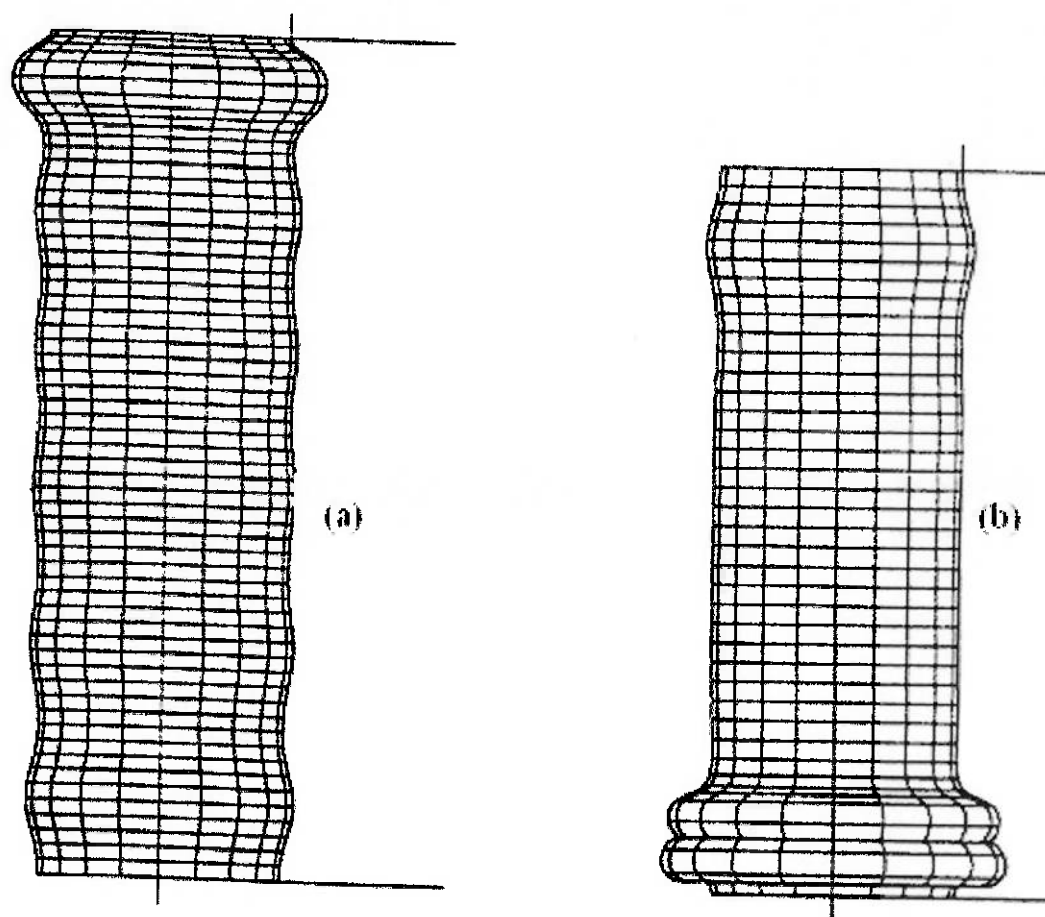


figura 9 – flambagem plástica-dinâmica (a) e dinâmica progressiva (b)

Para ter-se uma referência no trabalho a ser desenvolvido os tipos de flambagem encontrados na *ref.bib.[1]* são descritos a seguir. Nessa pesquisa a geometria da peça (cilíndrica) é diferente daquela que vai ser estudada aqui (ver objetivos), mas a

importância do entendimento desse trabalho é que muitas características podem ser encontradas em comum.

Os esforços do trabalho em [1] podem ser resumidos através dos gráficos abaixo:

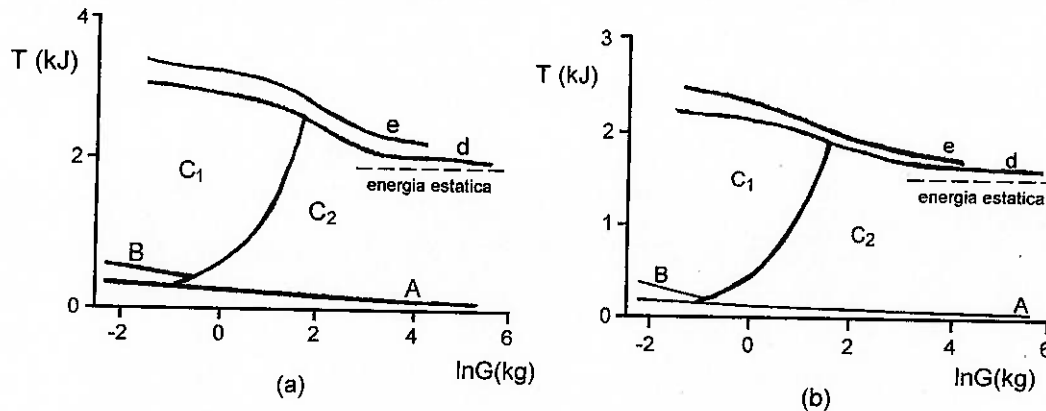


figura 10 – regiões de tipos de impacto observadas em peças cilíndricas

No eixo das abcissas localiza-se o logaritmo natural da massa de impacto e no das ordenadas a energia absorvida pela peça. A diferença entre as simulações nos gráficos a) e b) é que no primeiro o comprimento considerado para a peça é maior.

Através das regiões dos gráficos, pode-se observar os tipos de fenômenos que podem ser encontrados:

- A* - compressão axial uniforme;
- B* - flambagem plástica-dinâmica;
- C₁* - composição de flambagem plástica-dinâmica no início seguida de uma flambagem progressiva;
- C₂* - flambagem progressiva;
- d* - máxima energia que pode ser absorvida por uma peça feita de material não sensível à taxa de deformação;
- e* - máxima energia que pode ser absorvida por uma peça feita de material sensível à taxa de deformação.

Se a energia cinética inicial da carga for baixa, as regiões A ou B podem ser verificadas. A região A representa compressão da peça, onde a energia de impacto é absorvida em compressão axial e expansão circunferencial uniforme. A energia absorvida dessa maneira é maior quanto menor a massa de impacto.

A região B representa a flambagem plástica dinâmica onde uma flambagem ocorre ao longo de toda a peça e a energia cinética é absorvida completamente em compressão. Nesse caso as massas são pequenas, mas as velocidades de impacto são relativamente maiores do que aquelas observadas na região A .

Com energias cinéticas maiores começa a ocorrer um fenômeno de ‘sanfonamento’ ou formação de dobras. Nesse caso a maneira como as dobras serão formadas depende da velocidade e da massa da carga. Para velocidades maiores a flambagem plástica-dinâmica ocorre, enquanto que em baixas velocidades observa-se uma flambagem progressiva. A forma como a flambagem se inicia é importante pois ela irá influenciar a forma final que a peça irá assumir.

Impactos de alta energia na região C_1 geram um processo de flambagem ao longo de toda a peça que depois continua a se desenvolver progressivamente. A velocidade inicial nessa situação é relativamente alta, mas as massas de impacto são baixas. Esse mecanismo, quando controlado, é o mais eficiente na absorção de energia.

C_2 representa a região em que se observa o fenômeno de flambagem progressiva. Neste caso as velocidades de impacto são baixas e as massas de impacto são relativamente altas. A peça colapsa de forma progressiva e pode ser considerado um fenômeno quasi-estático.

As curvas limite d e e nas figuras indicam a máxima energia que pode ser absorvida pela peça, sendo que na curva d a peça é feita de um material não sensível à taxa de deformação e a curva e representa um material sensível à essa taxa. Entende-se como a máxima energia que um corpo pode absorver quando ocorrer o completo esmagamento deste.

As simulações numéricas também mostraram que uma maior energia é absorvida usando-se peças carregadas dinamicamente do que quando são carregadas de uma forma quasi-estática, isso se for levado em conta que houve um completo esmagamento. Através do gráfico pode-se observar essa característica, pois a linha tracejada indica a máxima energia que pode ser absorvida pela peça de forma estática, sendo então inferior às curvas *d* e *e*.

Um outro tipo de flambagem que pode ocorrer, mas que não está descrito na *figura 10*, é a flambagem global. Neste caso somente algumas rótulas são formadas, sendo assim este é um mecanismo muito pouco eficiente na absorção de energia de impacto.

O caso de flambagem global não foi registrado pois os experimentos na *ref. [1]* foram conduzidos de forma a obter-se somente flambagem controlada, ou seja, não global.

Uma importante conclusão desse estudo é como os parâmetros de inércia, taxa de deformação e comprimento e módulo de encruamento da peça influenciam o fenômeno de impacto. O entendimento desses conceitos é importante porque não afeta somente o caso de peças cilíndricas, mas influencia impactos em geral que inclui o perfil estudado nesse presente trabalho. Uma breve descrição é dada abaixo:

- inércia → uma peça impactada com a mesma energia, mas resultante de diferentes combinações de massa e velocidade, resulta em formas finais diferentes. Esse fator gera as faixas de transição entre a flambagem progressiva e dinâmica;
- comprimento → o efeito do comprimento da peça pode ser observado comparando-se os *gráficos 10 (a) e (b)*. O gráfico *(b)* representa uma peça de comprimento menor do que em *(a)* e as condições de impacto são idênticas. Apesar dos gráficos serem qualitativamente similares, as escalas são diferentes e

de uma forma genérica, pode-se dizer que a capacidade de absorver energia da peça mais curta é menor;

- taxa de deformação \rightarrow da mesma forma, esse efeito pode ser observado através dos *gráficos 10 (a) e (b)*. Como dito anteriormente, o modelo da curva *d* despreza os efeitos da taxa de deformação e a curva *e* leva em conta esses efeitos. Conclui-se então que se for levado em conta a taxa de deformação, a peça necessita de mais energia para ser completamente esmagada;
- módulo de encruamento \rightarrow propriedades de encruamento do material influenciam o desenvolvimento de deformações plásticas locais durante a fase inicial do impacto. Ainda, peças com módulo de encruamento suficientemente pequeno flambam de maneira não simétrica, obviamente dependendo dos outros parâmetros também.

3.2 – Detalhes da simulação

Para o estudo que se segue um perfil denominado B250, cujas dimensões são de $A = 0,1\text{ m}$ e $C = 0,05\text{ m}$ (ver *figura 17*), foi utilizado. A fase final de simulação, que permitiu obter os resultados apresentados logo a seguir, foi realizada em uma estação de trabalho Compaq Alpha Station XP 1000 com ambiente UNIX, licenciada para o uso do programa Abaqus, Versão 6.2.1 (maiores detalhes no *Anexo B*). Em relação à versão utilizada durante grande parte do ano (Abaqus Versão 5.8), algumas mudanças ocorreram que tornaram necessário algumas alterações nos arquivos com a qual se vinha trabalhando.

A interação entre superfícies é realizada com a adoção de uma superfície “Slave” e uma outra “Master”. Dessa forma, no modelo criado foram utilizadas duas interações entre superfícies: entre a parte inferior do corpo de prova (slave) e a base metálica (master), e entre o topo do corpo de prova (slave) e a massa de impacto (master). Ambas as superfícies masters foram consideradas rígidas, ou seja, indeformáveis. Para isso utilizou-se o elemento rígido (rigid element) R3D4. O elemento de casca (Shell Element) utilizado para modelar os corpos de prova de perfil aberto foi o S4R, um elemento de 4 nós de propósito geral. A carga é aplicada como uma massa pontual que é presa aos nós da massa de impacto, modelando a força da gravidade. Um dos arquivos de entrada utilizado nas simulações se encontra no *Anexo A*, com o qual é possível, através da variação dos parâmetros de massa, que as dimensões da peça e a velocidade inicial consigam abranger todos as demais simulações.

A malha adotada possui um total de 2222 elementos, incluindo os elementos da massa de impacto e da base. A *figura 11* apresenta o modelo usado, onde a parte superior são os elementos da massa e a inferior a base.

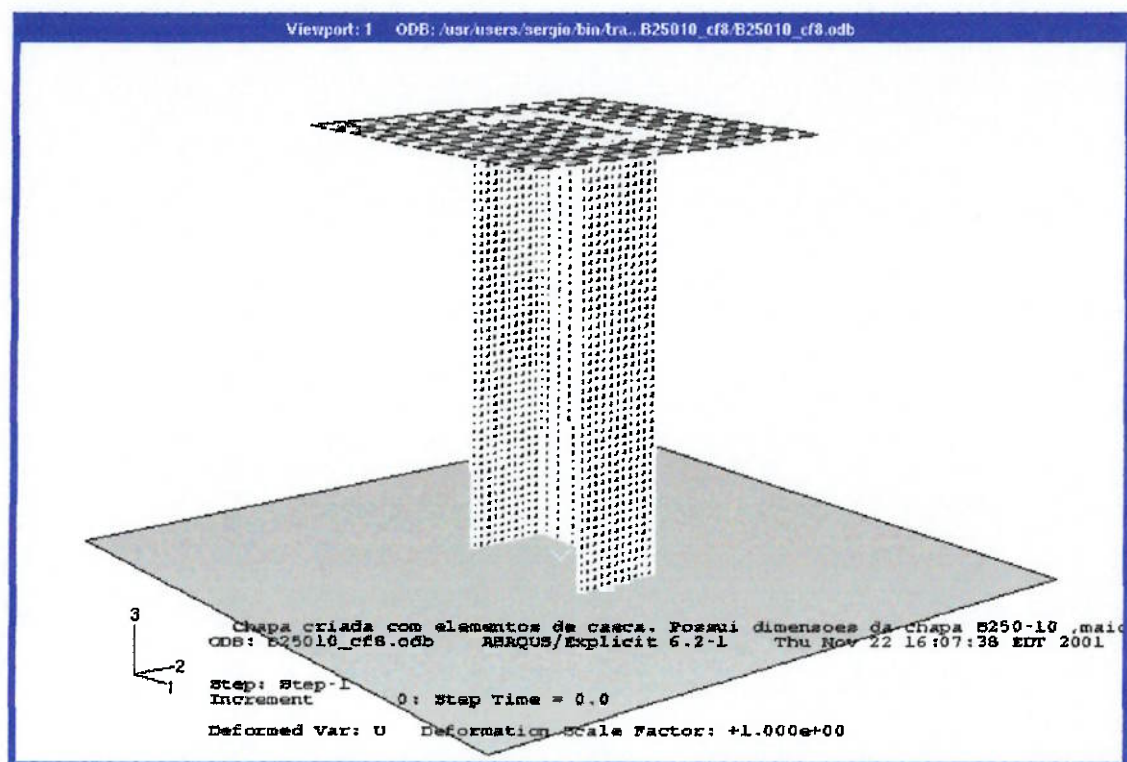


figura 11 – modelo usado nas simulações

Procurou-se utilizar valores próximos das massas de impacto disponíveis no laboratório de grandezas mecânicas da POLI, cujo valor máximo é atualmente de 200 kg. A faixa de velocidades de impacto foi determinada pela altura máxima de queda livre, e as condições de contorno foram modeladas supondo um engaste na base e um contato entre a massa de impacto e o topo do corpo de prova apresentando atrito de 0,25. Esse mesmo valor de atrito foi utilizado para o contato próprio da peça, que ocorre com o início da deformação da estrutura.

Pequenas amostras retiradas da mesma chapa que originaram os corpos de prova de perfil aberto (material considerado isotrópico) foram utilizadas para a realização de ensaios estático de tração, permitindo o levantamento das curvas de tensão versus deformação *figura 12*:

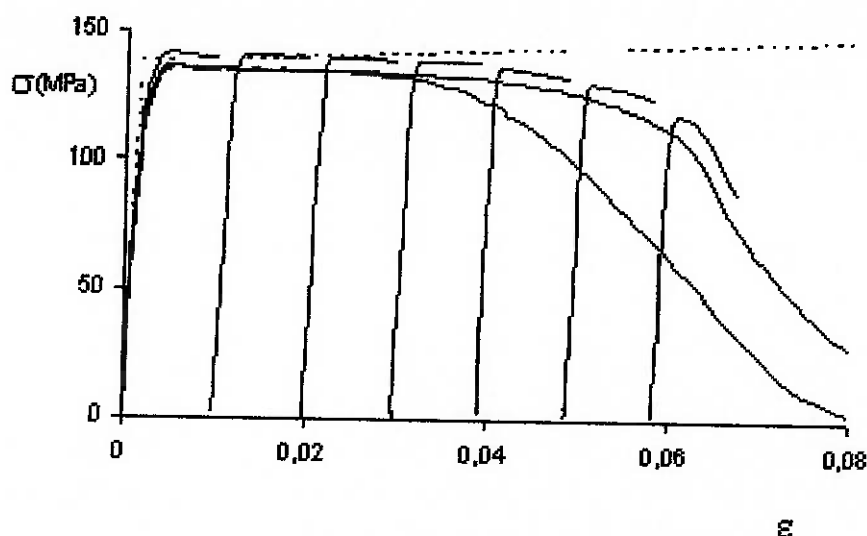


figura 12 - resultado do ensaio estático de tração

Para a realização experimental dos ensaios de impacto, foram construídas peças retangulares e uma base metálica, todas elas apresentando furos que possibilitam (através da inserção de pinos fixadores nesses furos) a restrição do corpo de prova nos seis graus de liberdade. Um equipamento de leitura a laser de velocidade permite obter com maior precisão a velocidade no momento do impacto.

O procedimento que virá em sequência será a validação do modelo e o estudo dos formatos finais obtidos. Para isso, primeiro a massa foi considerada como constante (200 kg) e variou-se a velocidade de impacto alterando-se a altura da queda desde 0,05 m até 1,00 m, com incrementos de 0,05 m. Verificando-se os formatos finais obtidos e as curvas de energia, estimou-se a quantidade de energia com a qual a próxima etapa foi desenvolvida. Fixando essa energia inicial (1444 J), variou-se os valores de velocidade inicial de impacto e, conseqüentemente, da massa de impacto, permitindo analisar a influência dos efeitos inerciais.

3.3 – Resultados

3.3.1 – Relação entre as etapas do fenômeno e a curva de energia

Duas simulações foram escolhidas para apresentar as curvas de energia do sistema e como elas se relacionam com o desenvolvimento do formato da peça.

Abaixo a variação da energia em função do tempo é descrita para uma velocidade inicial de 3,8 m/s e uma massa de 200 kg:

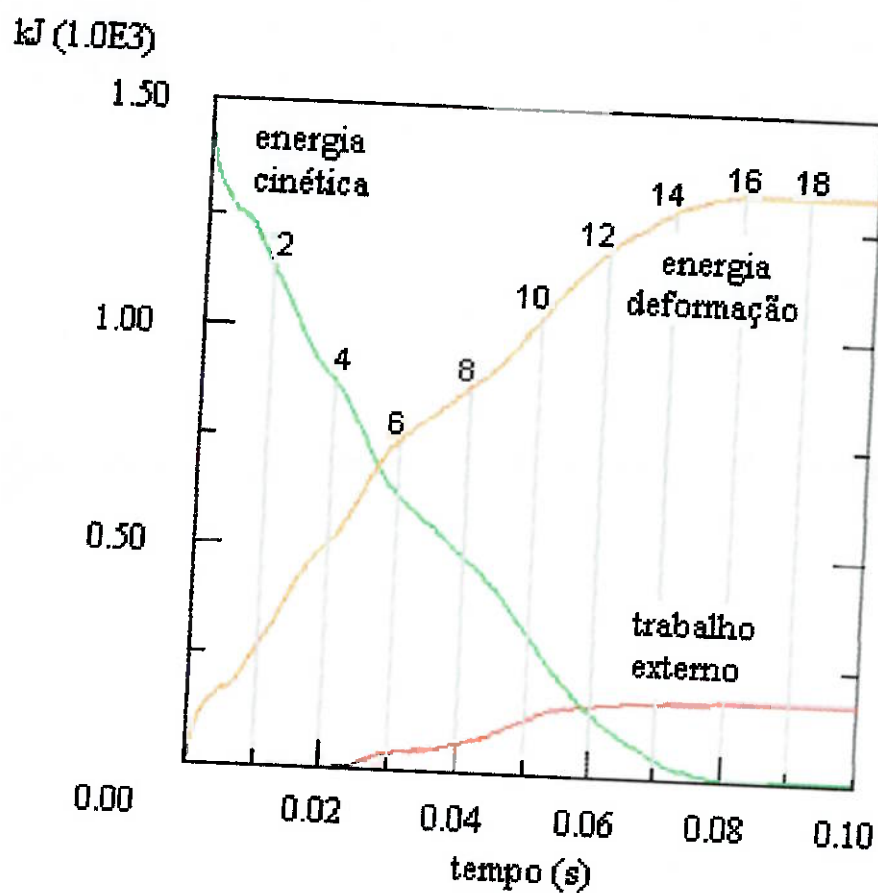
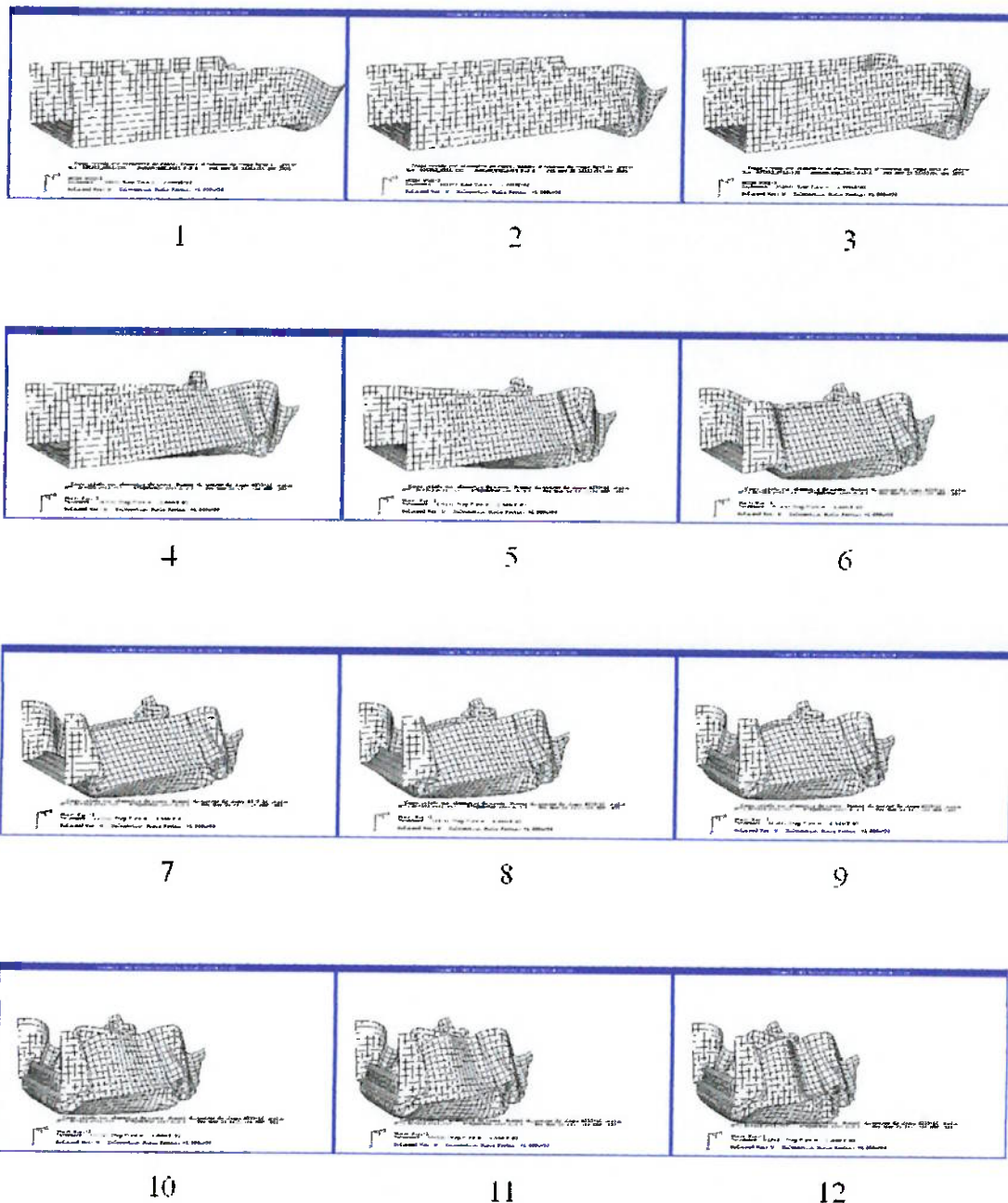


figura 13 (a) – curvas de energia no sistema em função do tempo. Velocidade inicial de 3,8 m/s e massa de 200 kg. Energia total de 1444 J.

As figuras 13 (b) [1 a 17] apresentam a forma da peça em diferentes instantes durante a flambagem para o mesmo fenômeno da *fig.13 (a)*. A peça foi girada para uma melhor visualização: a face em que surge a primeira dobra é a parte superior da peça (contato direto com a massa de impacto), enquanto que a outra é a face engastada.



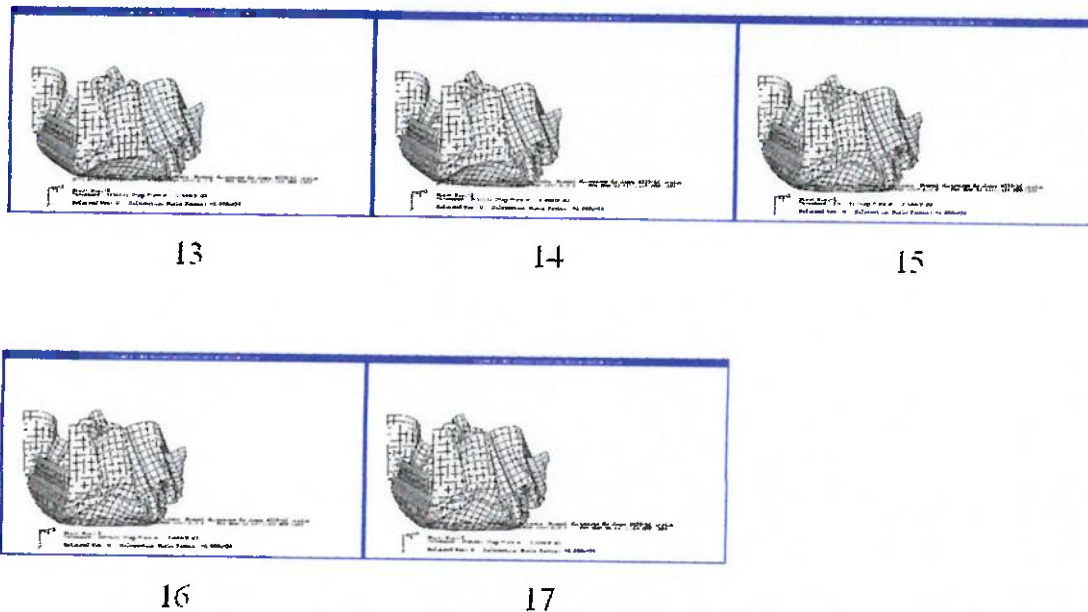


figura 13 (b) – [1 a 17] etapas da flambagem da peça

O formato final da peça pode ser melhor visualizado pela figura a seguir, onde a face engastada encontra-se na parte inferior:

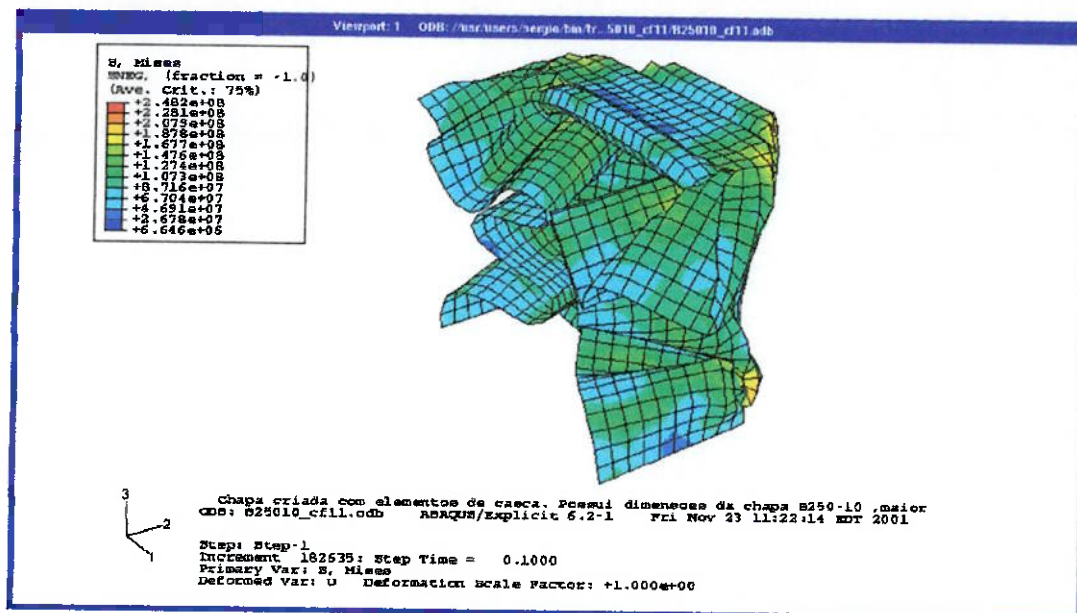


figura 13 (c) – formato final da peça

Usando agora uma velocidade de 4,39 m/s e massa de 150 kg, ou seja, mantendo a mesma energia total do fenômeno estudado anteriormente, obtém-se:

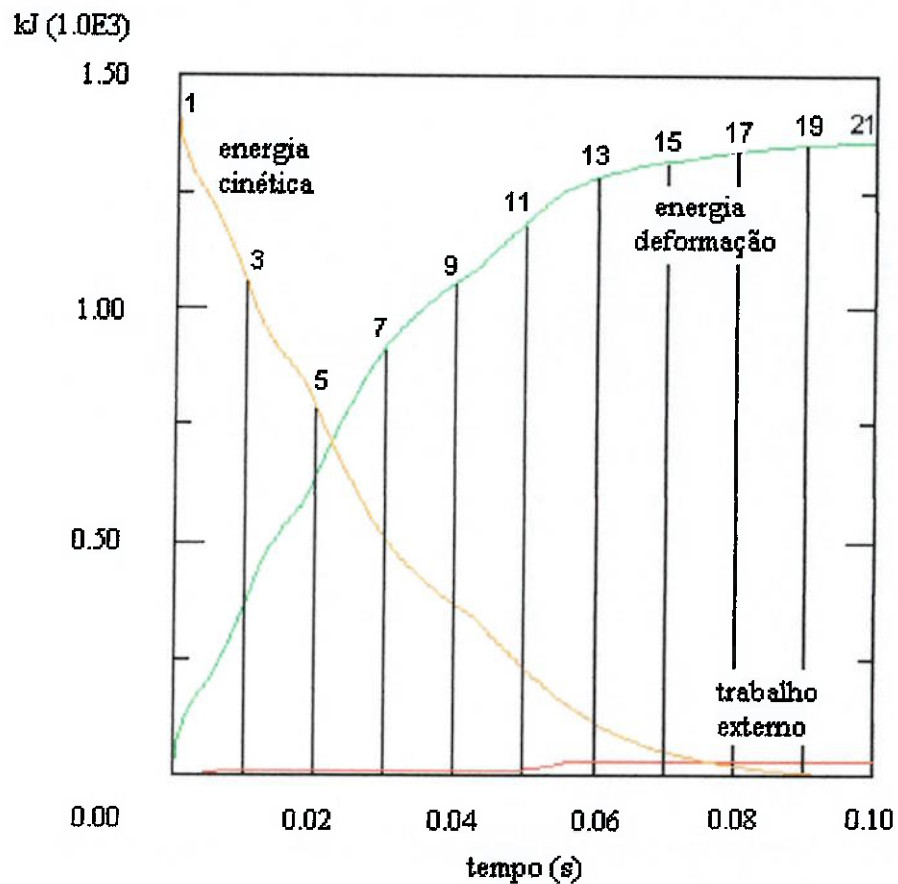
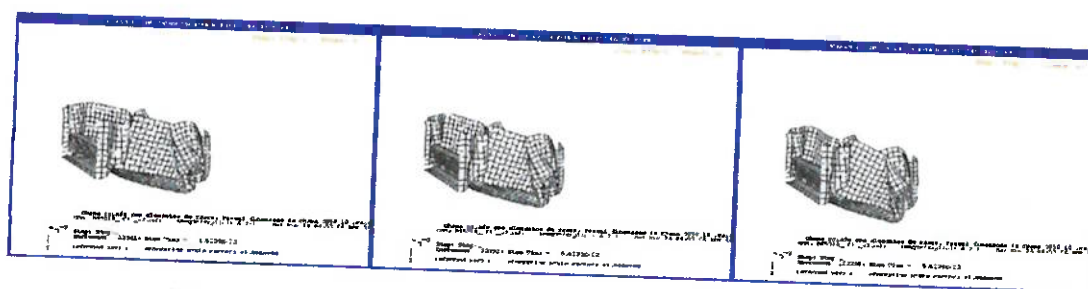
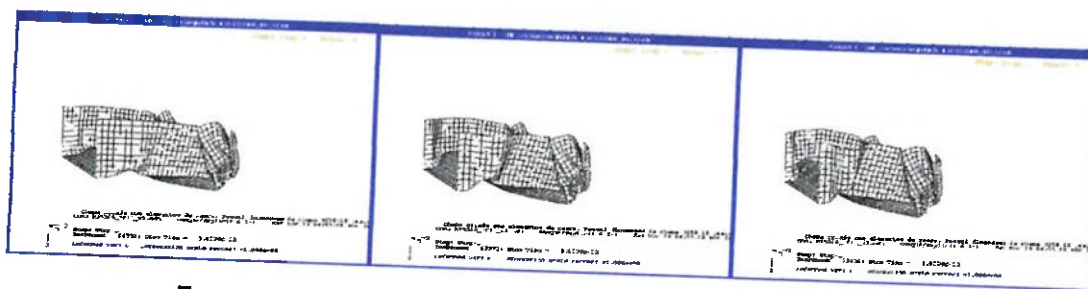
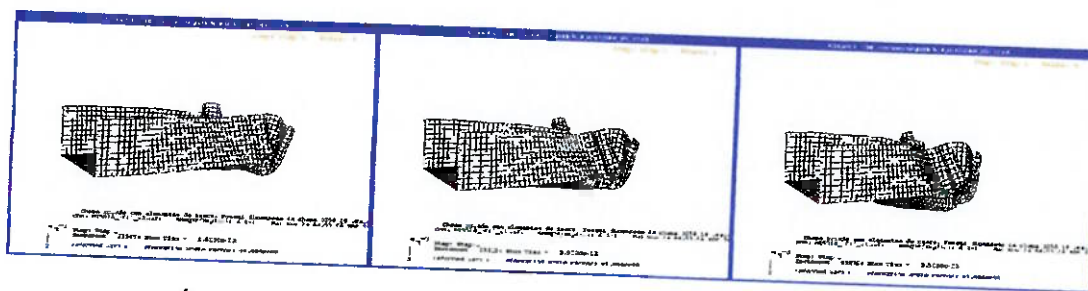
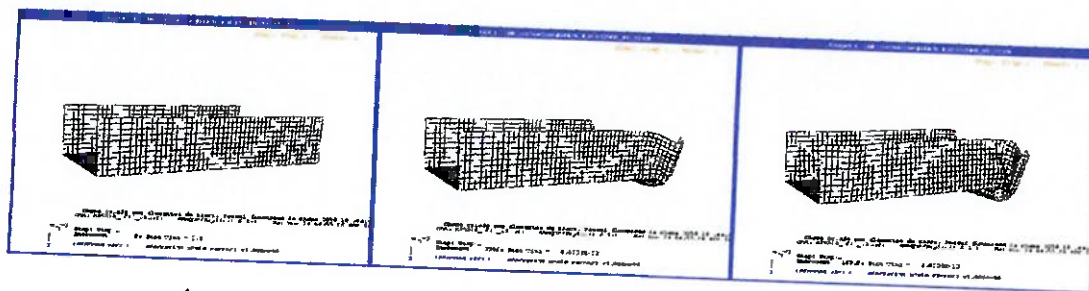


figura 14 (a) – curvas de energia no sistema em função do tempo. Velocidade inicial de 4,39 m/s e massa de 150 kg. Energia total de 1444 J.

Da mesma forma descreve-se as etapas de flambagem da peça na *fig. 14 (b)* [1 a 21].



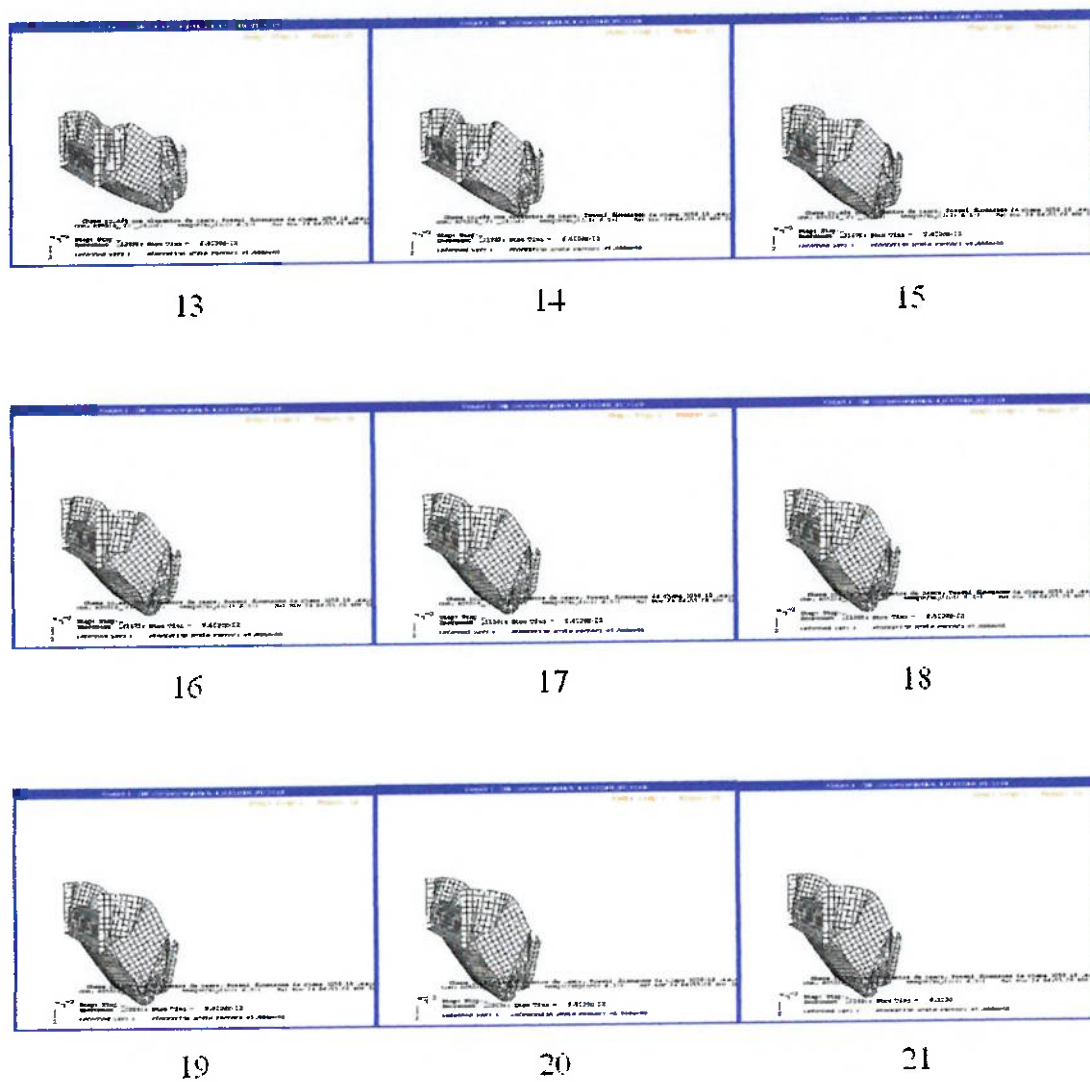


figura 14 (b) – [1 a 21] etapas da flambagem da peça

O formato final é apresentado na figura a seguir, onde a face engastada fica na parte inferior:

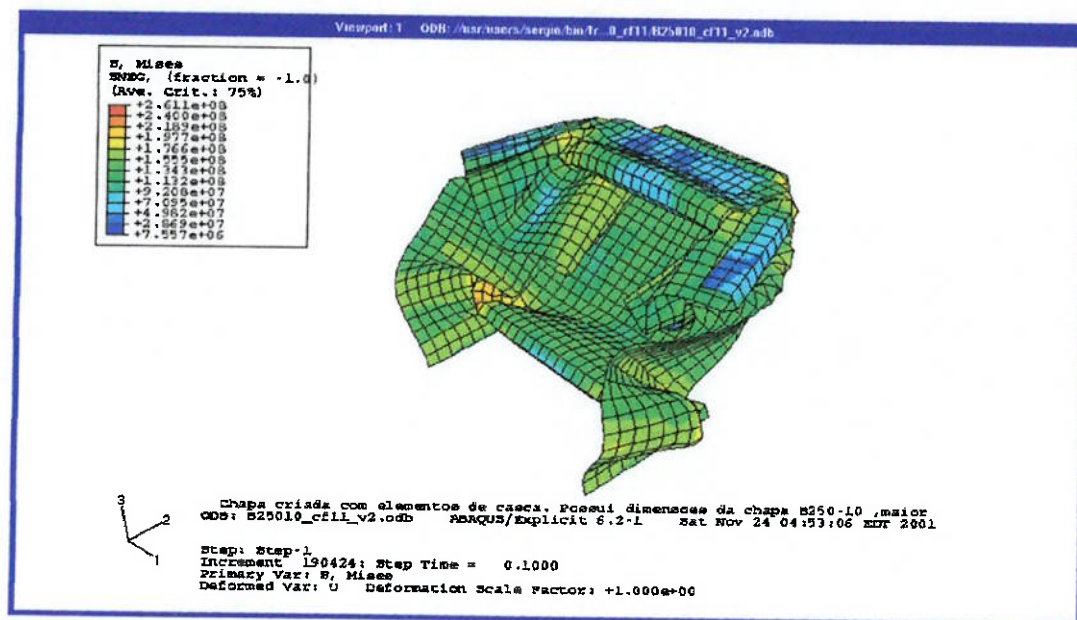


figura 14 (c) – formato final da peça

O que pode ser observado através dos dois exemplos é que há uma queda mais acentuada da Energia cinética quando uma dobra tem início ou quando o “lombo” da parte anterior da peça aumenta. Isso pode ser visto nas *figuras 13 (a) e (b)* aproximadamente nos instantes 4 a 5 quando a 3ª dobra está no início ou entre 9 e 11 quando o “lombo” sofre um aumento. De forma contrária uma menor dissipação é observada quando há apenas a compressão ou desenvolvimento das dobras já existentes, como pode ser visto nos instantes 11 a 16 do primeiro exemplo. Para o segundo exemplo (*figuras 14 (a) e (b)*) uma maior dissipação pode ser observada entre os instantes 2 a 4 devido ao início da formação da 2ª e 3ª dobras e nos instantes 5 a 6 devido ao aumento do “lombo” na parte anterior.

Esse fenômeno é óbvio pois a peça precisa de mais energia para iniciar uma dobra, mas depois de formada a dobra, esta colapsa com menos energia. A parte anterior da peça também precisa de mais energia para dobrar pois está “presa” nos dois lados, enquanto que as laterais tem um lado livre.

Os dados obtidos neste item servem como um meio de validação do modelo numérico, pois este acabou comportando-se conforme o esperado.

3.3.2 – Resultados da simulação para massa constante e velocidade variável

Com o valor de massa fixada em 200 kg, variou-se a velocidade de impacto ao longo de uma faixa de velocidade (1,00 m/s a 4,36 m/s) que permitiu acompanhar o comportamento da peça e observar o fenômeno ocorrido. Alguns dos resultados finais obtidos são mostrados a seguir:



[1]
 $v = 1,00 \text{ m/s}$
 $m = 200 \text{ kg}$



[2]
 $v = 2,24 \text{ m/s}$
 $m = 200 \text{ kg}$



[3]
 $v = 2,83 \text{ m/s}$
 $m = 200 \text{ kg}$



[4]
 $v = 3,00 \text{ m/s}$
 $m = 200 \text{ kg}$



[5]
 $v = 3,16 \text{ m/s}$
 $m = 200 \text{ kg}$



[6]
 $v = 3,32 \text{ m/s}$
 $m = 200 \text{ kg}$



[7]
 $v = 3,46 \text{ m/s}$
 $m = 200 \text{ kg}$



[8]
 $v = 3,60 \text{ m/s}$
 $m = 200 \text{ kg}$



[9]
 $v = 3,87 \text{ m/s}$
 $m = 200 \text{ kg}$

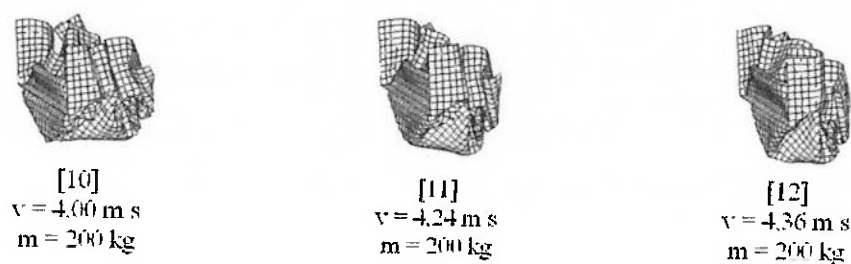
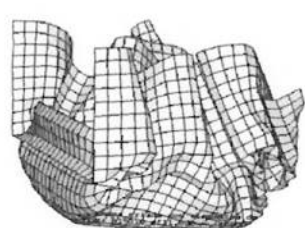


figura 15 – [1 a 12] formatos finais obtidos para a massa constante. A face superior (que entra em contato com a massa de impacto) está localizada sempre à direita de cada figura, enquanto que a face engastada localiza-se no lado esquerdo.

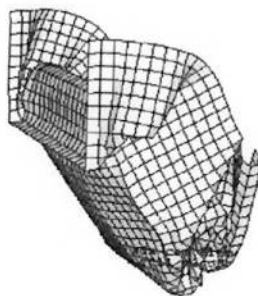
Na faixa que se estende de 1,00 m/s a 2,65 m/s a peça se deformou sempre progressivamente, com a formação de dobras se iniciando pela parte superior. As diferenças notadas foram em virtude do aumento progressivo de energia, como está mostrado nas simulações de 1,00 m/s e 2,24 m/s. Entretanto para a velocidade inicial de 2,83 m/s o formato final obtido mostra o início de uma concentração de tensão localizada próxima à base. Isso explica o resultado obtido para $v = 3,00 \text{ m/s}$ e $v = 3,16 \text{ m/s}$, em que o momento causado pelo ponto de concentração permitiu que a parede lateral da peça chegasse próximo de encostar na base. A dobra assim surgida impediu que a energia fosse transferida para a parte inferior da peça, sendo utilizada na deformação da parte superior. O aumento para $v = 3,32 \text{ m/s}$ teve como consequência a flambagem global da parte superior da peça. Porém, o aumento para $v = 3,46 \text{ m/s}$ mostra mais uma vez a influência dos efeitos inerciais, com a peça voltando a flambar de um modo progressivo. No intervalo de 3,46 m/s à 4,36 m/s, a flambagem se desenvolve de modo progressivo, até que a peça chega próximo de seu completo esmagamento.

3.3.3 – Resultados da simulação para energia constante

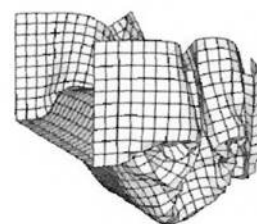
Mantendo a energia total do sistema constante (1444 J), variou-se a velocidade inicial e conseqüentemente a massa de impacto para obter simulações com diferentes parâmetros. A seguir são apresentados os formatos finais obtidos:



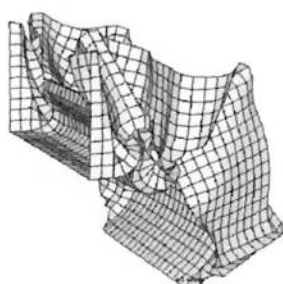
[1]
 $v = 3,8 \text{ m/s}$
 $m = 200 \text{ kg}$



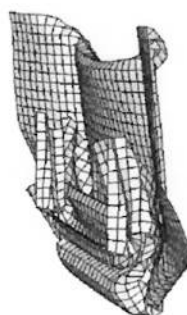
[2]
 $v = 4,39 \text{ m/s}$
 $m = 150 \text{ kg}$



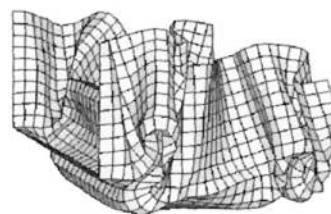
[3]
 $v = 5,37 \text{ m/s}$
 $m = 100 \text{ kg}$



[4]
 $v = 7,60 \text{ m/s}$
 $m = 50 \text{ kg}$



[5]
 $v = 10,75 \text{ m/s}$
 $m = 25 \text{ kg}$



[6]
 $v = 15,20 \text{ m/s}$
 $m = 12,5 \text{ kg}$

figura 16 [1 a 6] – formatos finais obtidos com energia total constante e velocidades e massas variáveis

Pelos formatos obtidos verifica-se que além dos tipos de flambagem descritos na teoria existem outros tipos que ainda não tem uma classificação clara, tendo um comportamento inicialmente progressivo, mas depois flambando de forma mais parecida com a global, como pode ser visto nas figuras 16 [2] e [5]. Além disso, comprova-se novamente não existe uma única faixa de transição, pelo menos para

essa energia (1444 J) e essa faixa de velocidades. Com 3,8 m/s a peça apresenta um comportamento progressivo e aumentando a velocidade para 4,39 m/s a mesma apresenta um comportamento entre o progressivo e o global. Se a velocidade for novamente aumentada para 5,37 m/s o comportamento volta a ser progressivo, mas com 10,75 m/s o global é novamente verificado no final do processo.

4 – LEIS DE SIMILARIDADE NO FENÔMENO DE IMPACTO

4.1 - Introdução

Quando o teste experimental em um protótipo em tamanho real é excessivamente caro, o único modo viável de solucionar o problema é através do teste de modelos em laboratório. Se o comportamento do protótipo através do modelo tem que ser feito, obviamente o modelo adotado não pode ser qualquer um. Os fenômenos no modelo e no protótipo devem ser relacionados por leis de escala convenientes.

Analizando para o caso específico de impacto, isso se torna ainda mais óbvio, pois os testes de impacto são destrutivos e na maioria dos casos torna-se impossível fazer os testes com protótipos em tamanho real. Para casos extremos pode-se imaginar a inviabilidade de se realizar testes em navios, por exemplo.

Por esse motivo foi feito neste trabalho uma análise dimensional para a peça em questão, permitindo posteriormente a realização de simulações numéricas para estudar a validade dos resultados aqui obtidos. Dessa maneira os resultados do trabalho terão uma maior aplicação prática, não ficando restritos somente ao impacto de peças de pequenas dimensões.

Outro problema também comum é que muitos fenômenos são complexos e envolvem muitos parâmetros. Se cada um desses parâmetros for variado de forma a obter uma gama de resultados para todos, a quantidade de testes a ser feito e o tempo gasto será muito grande, além disso, a visualização dos resultados não será muito adequada. Imagine por exemplo um fenômeno dependente de 4 parâmetros. Deve-se testar a dependência do fenômeno em relação a cada variável e mantendo as demais constantes. Se forem necessários 10 ensaios para cada variável, então 10^4 ensaios deveriam ser realizados. Se cada teste levasse meia hora e a jornada de trabalho diária fosse de 8 horas, a série completa iria requerer em torno de dois anos e meio para ser realizada, ou seja, tempo e custos excessivamente altos.

Para resolver esse problema a análise dimensional pode ser utilizada e obter resultados significativos. O teorema dos Pi de Buckingham é um enunciado da relação entre uma função expressa em termos de parâmetros dimensionais, e uma outra, relacionada à primeira, expressa em termos de parâmetros adimensionais. O emprego do teorema dos Pi de Buckingham permite desenvolver os parâmetros adimensionais de modo fácil, mas não permite que se defina a função que os relaciona, sendo estes obtidos de forma experimental. A seguir descreve-se de forma sucinta o teorema dos Pi de Buckingham e como este teorema pode ser utilizado para obter-se a Semelhança entre modelos de escalas diferentes.

4.2 - Teorema dos Pi de Buckingham

Dado um problema físico no qual o parâmetro dependente é uma função de $n - 1$ parâmetros independentes, podemos expressar a relação entre as variáveis de forma funcional, como:

$$q_1 = f(q_2, q_3, \dots, q_n) \quad (1)$$

onde q_1 é o parâmetro dependente e q_2, q_3, \dots, q_n são os $n - 1$ parâmetros independentes. Ou de forma equivalente:

$$g(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) = 0 \quad (2)$$

onde g é uma função não especificada, diferente de f .

O teorema dos Pi de Buckingham declara que: dada uma relação de n parâmetros de forma:

$$g(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) = 0 \quad (3)$$

então os n parâmetros podem ser agrupados em $n - m$ razões independentes adimensionais, ou parâmetros Π , que podem ser expressos na forma funcional por:

$$G(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}) = 0 \quad (4.a)$$

ou

$$\Pi_1 = G_1(\Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}) = 0 \quad (4.b)$$

O número m é usualmente, mas não sempre, igual ao número de dimensões independentes necessárias para especificar as dimensões de todos os parâmetros, q_1, q_2, \dots, q_n .

Através da *ref.bib.[4]*, pode-se verificar como esses adimensionais podem ser obtidos, mas o teorema não prevê a forma funcional de G ou G_1 , sendo necessário determiná-los experimentalmente. Ainda, os $n - m$ parâmetros Π não são únicos e podem ser dependentes dos outros adimensionais.

4.3 - Semelhança

Para ter utilidade, um teste com modelo deve fornecer dados que possam, por meio de transposição de escalas, fornecer as forças, momentos e cargas dinâmicas que existiriam no protótipo em tamanho real, ou seja, semelhança. A seguir determina-se as condições que devem ser atendidas para assegurar essa semelhança entre modelo e protótipo.

Primeiramente o modelo e o protótipo devem ser geometricamente semelhantes. A semelhança geométrica requer que ambos tenham a mesma forma, e que todas as dimensões lineares do modelo sejam relacionadas com correspondentes dimensões do protótipo por um fator de escala constante.

Outro requisito é a semelhança cinemática, ou seja, as velocidades em pontos correspondentes deverão estar no mesmo sentido e relacionar-se em magnitude por um fator de escala constante.

Quando protótipo e modelo têm distribuições de forças tais que tipos idênticos de forças são paralelas e relacionam-se em magnitude por um fator de escala constante em todos os pontos correspondentes, então os dois sistemas são dinamicamente

semelhantes. Os requisitos para semelhança dinâmica são mais restritivos, pois os sistemas devem possuir tanto semelhança cinemática quanto geométrica.

A fim de estabelecer as condições necessárias para a completa semelhança dinâmica, todas as forças que são importantes no fenômeno devem ser consideradas. As condições de teste devem ser estabelecidas de tal forma que todas as forças importantes relacionem-se pelo mesmo fator de escala entre os escoamentos para o modelo e para o protótipo.

Pelo teorema dos Pi dos Buckingham a condição para semelhança é atendida se os grupos adimensionais que governam o fenômeno forem iguais exceto um.

Porém, em muitos estudos com modelos, a consecução de semelhança dinâmica exige a reprodução de diversos grupos adimensionais. Em alguns casos, a completa semelhança dinâmica entre modelo e protótipo pode não ser atingida, sendo assim uma semelhança incompleta. Para esses casos alguns ajustes serão necessários nos resultados obtidos pelo modelo.

4.4 - Análise no caso de peças em perfil aberto

4.4.1 - Obtenção dos números adimensionais

Para a peça em estudo os seguintes grupos foram considerados baseando-se no sistema MLT (massa – comprimento – tempo):

grupo	quantidade	dimensão
W	massa de impacto	M
v	Velocidade inicial	LT^{-1}
V	A x B x C	L^3
t	tempo	T
E_h	módulo de encruamento	$ML^{-1}T^{-2}$
c	velocidade de onda	LT^{-1}
D	espessura da chapa	L
σ	tensão	$ML^{-1}T^{-2}$
σ_0	tensão de escoamento	$ML^{-1}T^{-2}$
δ	deslocamento	L
I	momento de inércia	L^4

tabela 1 – grupos dimensionais

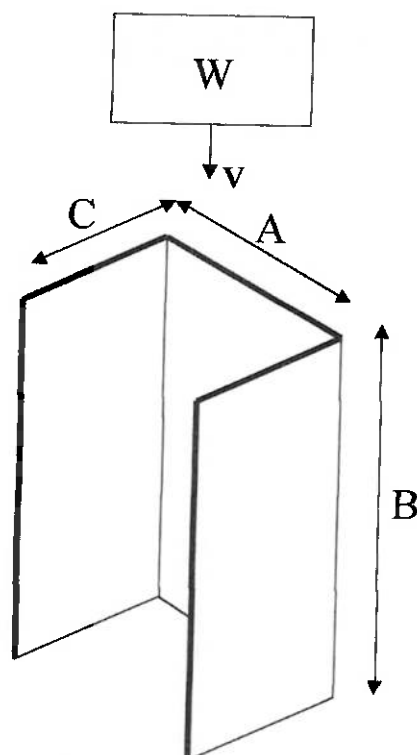


figura 17 - parâmetros da peça

O número de adimensionais a ser determinando será:

$$n = 11$$

$$r = 3$$

$$m = n - r = 8$$

e selecionando os parâmetros que se repetem como W , v e V , obtém-se o primeiro adimensional da seguinte forma:

$$\Pi_1 = W^a v^b V^c E_h = M^{a+1} L^{b+3c-1} T^{-b-2}$$

como Π_1 deve ser adimensional, tem-se que:

$$\begin{cases} a+1=0 \\ b+3c-1=0 \\ -b-2=0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 3 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} a=-1 \\ b=-2 \\ c=1 \end{cases}$$

assim:

$$\Pi_1 = \frac{VE_h}{Wv^2}$$

por fim confere-se a adimensionalidade de Π_1 :

$$\Pi_1 = L^3 ML^{-1} T^{-2} M^{-1} L^{-2} T^2 = [1]$$

Similarmente determina-se os outros adimensionais:

$$\Pi_2 = \frac{c}{v}$$

$$\Pi_3 = \frac{D}{\sqrt[3]{V}}$$

$$\Pi_4 = \frac{V\sigma}{Wv^2}$$

$$\Pi_5 = \frac{V\sigma_0}{Wv^2}$$

$$\Pi_6 = \frac{\delta}{\sqrt[3]{V}}$$

$$\Pi_7 = \frac{I}{V^{4/3}}$$

$$\Pi_8 = \frac{tv}{\sqrt[3]{V}}$$

Agora uma pré análise será feita de forma a se determinar se é possível atender a todos os números adimensionais ao mesmo tempo no problema em questão.

4.4.2 - Análise da relação dos parâmetros básicos

Antes de se verificar a igualdade ou não dos adimensionais obtidos, uma análise das variáveis que os constituem será feita para facilitar os cálculos:

4.4.2.1 - massa

A massa pode ser obtida por:

$M = \rho V$, como $V_{\text{modelo}} = \beta^3 V_{\text{protótipo}}$ e $\rho_{\text{modelo}} = \rho_{\text{protótipo}}$, tem-se:

$$M_{\text{modelo}} = \beta^3 M_{\text{protótipo}}$$

4.4.2.2 - velocidade inicial

Tem-se:

$$v_{\text{modelo}} = \frac{\delta_{\text{modelo}}}{t_{\text{modelo}}} = \frac{\beta \delta_{\text{protótipo}}}{\beta t_{\text{protótipo}}}$$

logo as velocidades são idênticas:

$$v_{\text{modelo}} = v_{\text{protótipo}}$$

4.4.2.3 - comprimento

A relação entre os comprimentos do protótipo e modelo será dado por um fator de escala geométrico:

$$A_{\text{modelo}} = \beta A_{\text{protótipo}}$$

$$B_{\text{modelo}} = \beta B_{\text{protótipo}}$$

$$C_{\text{modelo}} = \beta C_{\text{protótipo}}$$

O único elemento geométrico que não é afetado pelo fator de escala será a espessura da chapa, ou seja:

$$D_{\text{modelo}} = D_{\text{protótipo}}$$

4.4.2.4 - tempo

O tempo necessário para que uma onda viaje a uma distância L é dado por L/C , assim:

$$\frac{t_{\text{protótipo}}}{t_{\text{modelo}}} = \frac{L_{\text{protótipo}}}{L_{\text{modelo}}} \frac{c_{\text{modelo}}}{c_{\text{protótipo}}} = \beta$$

$$t_{\text{modelo}} = \beta t_{\text{protótipo}}$$

4.4.2.5 – propriedades materiais

Considerando que o modelo e protótipo sejam constituídos do mesmo material, então o módulo de encruamento será o mesmo para ambos. O mesmo vale para todas as outras propriedades materiais.

$$(E_h)_{\text{modelo}} = (E_h)_{\text{protótipo}}$$

$$\rho_{\text{modelo}} = \rho_{\text{protótipo}}$$

4.4.2.6 - velocidade da onda

A tensão se propaga em uma barra com velocidade $(E/\rho)^{1/2}$ de acordo com teorias elementares de ondas de tensão. Como a velocidade depende somente do material, então a velocidade para protótipo e modelo é a mesma:

$$c_{\text{modelo}} = c_{\text{protótipo}}$$

4.4.2.7 – espessura da chapa

Será considerado que a espessura da chapa entre modelo e protótipo será a mesma, pois é difícil manter essa relação por um fator de escala devido aspectos construtivos, como por exemplo obter duas chapas com relação de espessura de $1/2$. Logo:

$$D_{\text{protótipo}} = D_{\text{modelo}}$$

4.4.2.8 – tensão e tensão de escoamento

De acordo com a Lei de Hooke, a tensão é dada por:

$$\sigma_{\text{modelo}} = (E_h)_{\text{modelo}} \varepsilon_{\text{modelo}} = (E_h)_{\text{protótipo}} \varepsilon_{\text{protótipo}}$$

logo as tensões são idênticas:

$$\sigma_{\text{modelo}} = \sigma_{\text{protótipo}}$$

e o mesmo vale para a tensão de escoamento:

$$(\sigma_0)_{\text{modelo}} = (\sigma_0)_{\text{protótipo}}$$

4.4.2.9 – momento de inércia

Considerando a seção da peça para o protótipo têm-se:

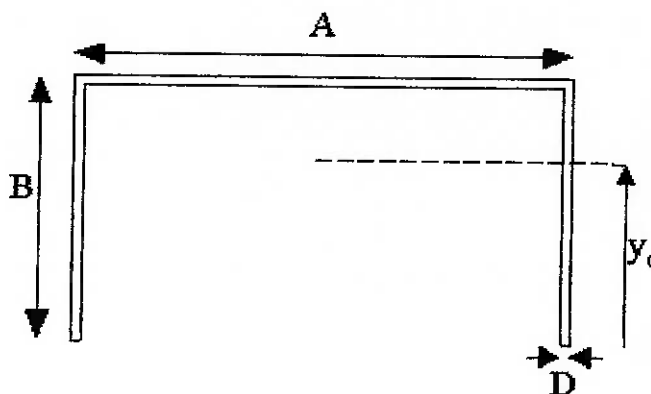


figura 18 – seção transversal do protótipo (tamanho real)

primeiramente calcula-se a posição da linha neutra da seção (y_c):

$$y_c \approx \frac{2BDB/2 + ADB}{2DB + AD} = \frac{B(B+A)}{2B+A}$$

agora o momento de inércia pode ser calculado:

$$I_{\text{protótipo}} \approx \frac{AD^3}{12} + AD \left[B - \frac{B(B+A)}{2B+A} \right]^2 + 2 \frac{DB^3}{12} + 2DB \left[\frac{B}{2} - \frac{B(B+A)}{2B+A} \right]^2$$

$$I_{\text{protótipo}} \approx \frac{AD^3}{12} + \frac{DB^3}{6} + \frac{ADB^2}{2(2B+A)^2} (2B^2 + AB)$$

Considerando agora a seção para o modelo:

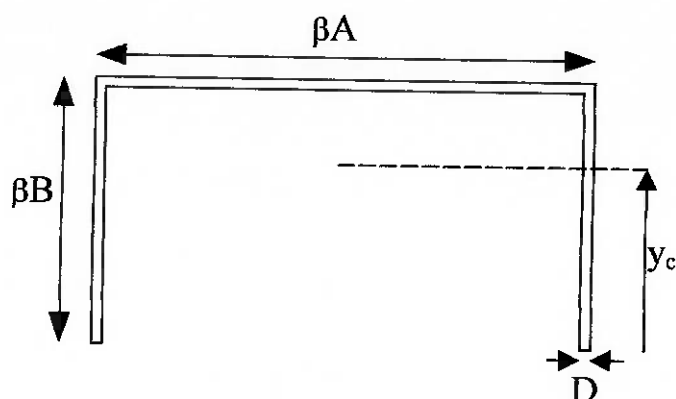


figura 19 – seção transversal do modelo (em escala)

Calculando o momento da seção em relação à linha neutra de forma análoga ao item anterior obtém-se:

$$I_{\text{modelo}} = \beta \frac{AD^3}{12} + \beta^3 \frac{DB^3}{6} + \beta^3 \frac{ADB^2}{2(2B+A)^2} (2B^2 + AB)$$

Ainda se for considerado o valor de D muito menor do que A e B , então o termo $\frac{AD^3}{12}$ podem ser desprezado, ou seja, os valores do momento de inércia podem ser aproximados como:

$$I_{\text{protótipo}} \approx \frac{DB^3}{6} + \frac{ADB^2}{2(2B+A)^2} (2B^2 + AB)$$

$$I_{\text{modelo}} = \beta^3 \frac{DB^3}{6} + \beta^3 \frac{ADB^2}{2(2B+A)^2} (2B^2 + AB)$$

o que resulta na relação aproximada:

$$I_{\text{modelo}} \approx \beta^3 I_{\text{protótipo}}$$

4.4.2.10 - deformação

A deformação é dada por:

$$\varepsilon_{\text{modelo}} = \frac{\delta_{\text{modelo}}}{L_{\text{modelo}}} = \frac{\beta \delta_{\text{modelo}}}{\beta L_{\text{modelo}}} = \frac{\delta_{\text{protótipo}}}{L_{\text{protótipo}}}$$

logo a deformação para modelo e protótipo são idênticos:

$$\varepsilon_{\text{modelo}} = \varepsilon_{\text{protótipo}}$$

4.4.2.11 – Resumo

Elemento	relação modelo / protótipo
massa	β^3
velocidade	1
comprimentos A, B e C	β
espessura D	1
tempo	β
módulo de Young	1
densidade	1
velocidade de onda	1
tensão	1
tensão de escoamento	1
momento de inércia	β^3
deformação	1

tabela 2– resumo das relações entre modelo e protótipo

4.4.3 - Análise dos adimensionais obtidos

Uma análise será feita a fim de se verificar quais adimensionais podem atender a condição de igualdade.

4.4.3.1 - Π_1

$$\text{Tem-se } \Pi_{1\text{protótipo}} = \frac{V_{\text{protótipo}} (E_h)_{\text{protótipo}}}{W_{\text{protótipo}} v_{\text{protótipo}}^2} \text{ e}$$

$$\Pi_{1\text{modelo}} = \frac{V_{\text{modelo}} (E_h)_{\text{modelo}}}{W_{\text{modelo}} v_{\text{modelo}}^2} = \frac{\beta^3 V_{\text{protótipo}} (E_h)_{\text{protótipo}}}{\beta^3 W_{\text{protótipo}} v_{\text{protótipo}}^2}$$

$$\Pi_{1\text{modelo}} = \Pi_{1\text{protótipo}}$$

Logo a igualdade pode ser obtida por devido às semelhanças geométricas.

4.4.3.2 - Π_2

Como $c_{\text{protótipo}} = c_{\text{modelo}}$ e $v_{\text{protótipo}} = v_{\text{modelo}}$ então:

$$\Pi_{2\text{modelo}} = \frac{c_{\text{modelo}}}{v_{\text{modelo}}} = \frac{c_{\text{protótipo}}}{v_{\text{protótipo}}} = \Pi_{2\text{protótipo}}$$

$$\Pi_{2\text{modelo}} = \Pi_{2\text{protótipo}}$$

4.4.3.3 - Π_3

Neste caso a igualdade não pode ser atendida pois:

$$\Pi_{3\text{protótipo}} = \frac{D_{\text{protótipo}}}{\sqrt[3]{V_{\text{protótipo}}}}$$

$$\text{e } \Pi_{3\text{modelo}} = \frac{D_{\text{modelo}}}{\sqrt[3]{V_{\text{modelo}}}} = \frac{D_{\text{modelo}}}{\beta^3 \sqrt[3]{V_{\text{protótipo}}}}$$

como $D_{\text{modelo}} = D_{\text{protótipo}}$ a igualdade não é possível.

4.4.3.4 - Π_4 e Π_5

Tem-se $\Pi_{4\text{protótipo}} = \frac{V_{\text{protótipo}} \sigma_{\text{protótipo}}}{W_{\text{protótipo}} v_{\text{protótipo}}^2}$ e

$$\Pi_{4\text{modelo}} = \frac{V_{\text{modelo}} \sigma_{\text{modelo}}}{W_{\text{modelo}} v_{\text{modelo}}^2} = \frac{\beta^3 V_{\text{protótipo}} \sigma_{\text{protótipo}}}{\beta^3 W_{\text{protótipo}} v_{\text{protótipo}}^2}$$

$$\Pi_{4\text{modelo}} = \Pi_{4\text{protótipo}}$$

Logo a igualdade pode ser obtida por devido às semelhanças geométricas. O mesmo pode ser verificado de uma forma análoga para Π_5 :

$$\Pi_{5\text{modelo}} = \Pi_{5\text{protótipo}}$$

4.4.3.5 - Π_6

Tem-se:

$$\Pi_{6\text{protótipo}} = \frac{\delta_{\text{protótipo}}}{\sqrt[3]{V_{\text{protótipo}}}}$$

$$\text{e } \Pi_{6\text{modelo}} = \frac{\delta_{\text{modelo}}}{\sqrt[3]{V_{\text{modelo}}}} = \frac{\beta \delta_{\text{protótipo}}}{\beta^3 \sqrt[3]{V_{\text{protótipo}}}}$$

logo:

$$\Pi_{6\text{modelo}} = \Pi_{6\text{protótipo}}$$

4.4.3.6 - Π_7

Resulta em:

$$\Pi_{7\text{protótipo}} = \frac{I_{\text{protótipo}}}{V_{\text{protótipo}}^{4/3}} \text{ e}$$

$$\Pi_{7\text{modelo}} = \frac{I_{\text{modelo}}}{V_{\text{modelo}}^{4/3}} = \frac{I_{\text{modelo}}}{\beta^4 V_{\text{protótipo}}^{4/3}}$$

mas como I_{modelo} e $I_{\text{protótipo}}$ se relacionam por um fator de escala de β^3 , então a igualdade não pode ser obtida.

4.4.3.7 - Π_8

Essa igualdade pode ser facilmente obtida pois:

$$\Pi_{8_{protótipo}} = \frac{t_{protótipo} v_{protótipo}}{\sqrt[3]{V_{protótipo}}} \text{ e}$$

$$\Pi_{8_{modelo}} = \frac{t_{modelo} v_{modelo}}{\sqrt[3]{V_{modelo}}} = \frac{\beta t_{protótipo} v_{protótipo}}{\beta \sqrt[3]{V_{protótipo}}}$$

logo:

$$\Pi_{8_{modelo}} = \Pi_{8_{protótipo}}$$

Portanto não é possível igualar todos os adimensionais devido ao parâmetro D .

4.5 – Detalhes da simulação

As características da simulação e do modelo são idênticas ao do item 2.2, sendo a programação usada a mesma do *anexo A*, diferenciando-se apenas as dimensões da peça, a massa e a velocidade inicial de impacto.

As seguintes escalas e dimensões foram utilizadas para estudar-se o fator de escala:

simulação	fator de escala	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	massa (kg)	velocidade inicial (m/s)
1	$\beta = 1$	100	250	50	1,50	200	3,8
2	$\beta = \frac{1}{2}$	50	125	25	1,50	25	3,8
3	$\beta = \frac{1}{2}$	50	125	25	0,75	25	3,8
4	$\beta = 1$	100	250	50	1,50	3,209	30,0
5	$\beta = \frac{1}{2}$	50	125	25	0,75	0,401	30,0
6	$\beta = 1$	100	250	50	1,50	3,209	30,0
7	$\beta = 1$	100	250	50	1,50	6,0	30,0
8	$\beta = \frac{1}{2}$	50	125	25	0,75	0,75	30,0

tabela 3– dados para as simulações de similaridade

As simulações 1, 2 e 3 visam verificar o efeito da espessura na Similaridade. A primeira peça tem fator de escala unitário, a segunda é escalonada mantendo a mesma espessura da peça em 1 e a terceira é completamente escalonada, ou seja, tem metade da espessura da peça em 1.

As simulações 5 e 6 usaram velocidades maiores para o estudo da semelhança, sendo o primeiro com $\beta = 1$ e o segundo $\beta = \frac{1}{2}$.

Finalmente, as simulações 6, 7 e 8 diferem dos demais por levarem em consideração a taxa de deformação. Na condição 6, os mesmos parâmetros da simulação 4 foram utilizados para comparar-se os formatos finais da peça com efeito da taxa e outra sem. Em 7 e 8 foram comparadas peças escalonadas entre si para estudar a Similaridade levando-se em consideração a taxa de deformação.

4.6 – Resultados

4.6.1 – Verificação do efeito da espessura na Similaridade

Com a espessura não escalonada não é possível obter a Similaridade no perfil estudado conforme visto no item 4.4.3. Porém em alguns fenômenos alguns adimensionais acabam predominando sobre os demais, por isso o fator espessura será verificado neste item.

Primeiro foi feito uma simulação com fator de escala unitário adotando-se uma velocidade inicial de 3,8 m/s e massa de impacto de 200 kg (simulação 1).

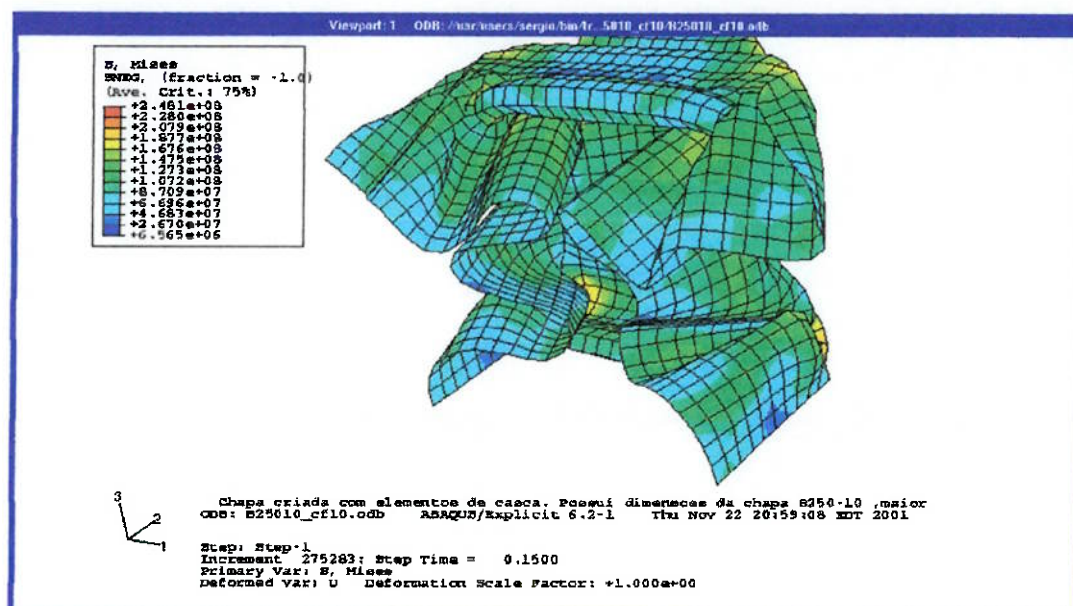


figura 20 – formato final para o fator de escala unitário (simulação 1). Velocidade inicial de 3,8 m/s e massa de impacto de 200 kg.

Depois foi aplicado um fator de escala de $\frac{1}{2}$, mas com a espessura $D = 1,5 \text{ mm}$ (simulação 2). Essa dimensão não foi escalonada pois para peças reais é difícil obter uma chapa com escala exata de $\frac{1}{2}$, ou mesmo com outros β 's. O seguinte formato foi obtido:

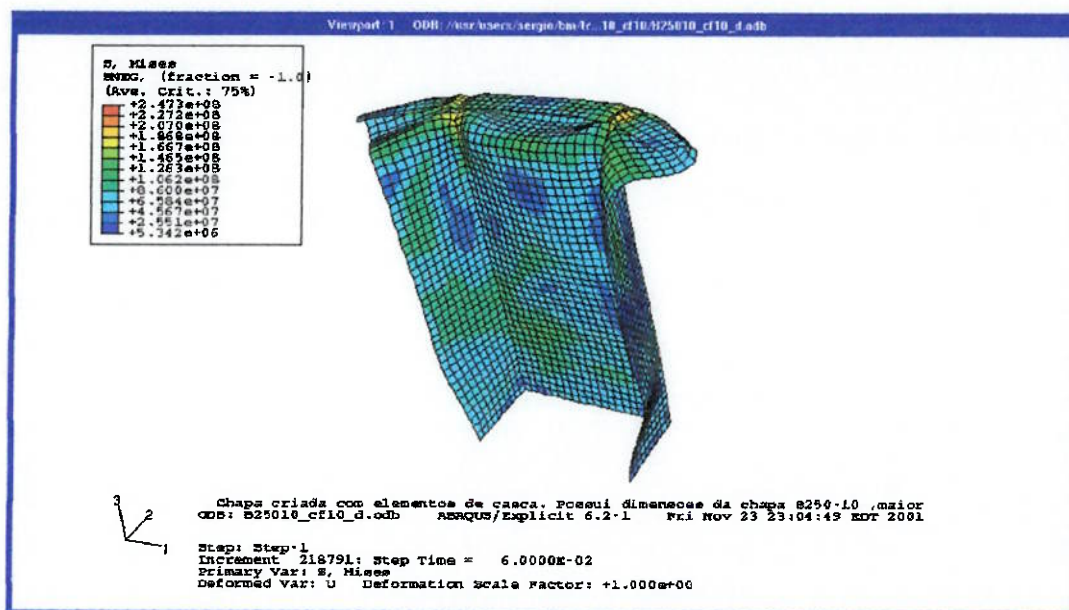


figura 21 – formato final para fator de escala $\frac{1}{2}$ e espessura não escalonada (simulação 2). Velocidade inicial de 3,8 m/s e massa de impacto de 25 kg.

Agora o fator de escala de $\frac{1}{2}$ foi aplicado, mas com espessura de $D = 0,75 \text{ mm}$ (simulação 3), o que por teoria gera a completa similaridade, pois dessa forma todos os adimensionais do modelo e do protótipo podem ser igualados. A relevância da espessura no fenômeno pode então ser analisada como na figura a seguir:

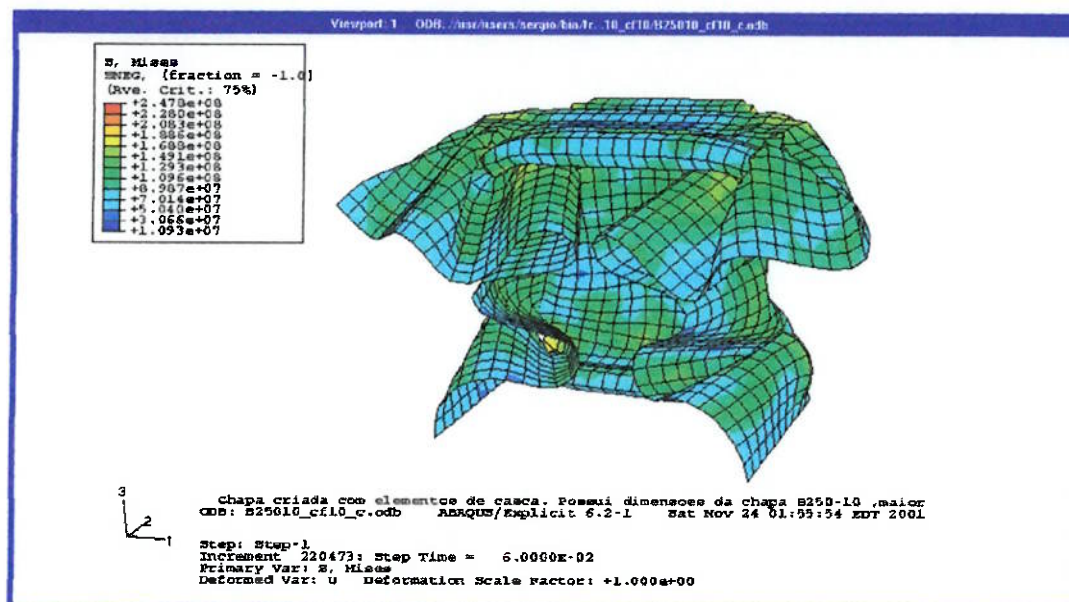


figura 22 – formato final para fator de escala $\frac{1}{2}$ e espessura escalonada (simulação 3). Velocidade inicial de 3,8 m/s e massa de impacto de 25 kg.

Primeiro comparando-se os resultados das simulações 1 e 2, pode-se verificar claramente que a espessura tem grande relevância para o escalonamento e as teorias clássicas não podem ser aplicadas se D também não for dimensionado de forma conveniente. Esse fator influencia inclusive o modo de flambagem da peça, pois comparando-se as simulações 1 e 2 é observado que a dobra próxima da base inicia-se de forma de maneira diferente, ou seja, indo para fora e não para dentro.

Comparando agora as simulações 1 e 3, as *figuras 20 e 22* mostram que os formatos finais obtidos são similares. Ainda, através dos gráficos de energia obtém-se o tempo de impacto (quando a energia cinética atinge valor nulo):

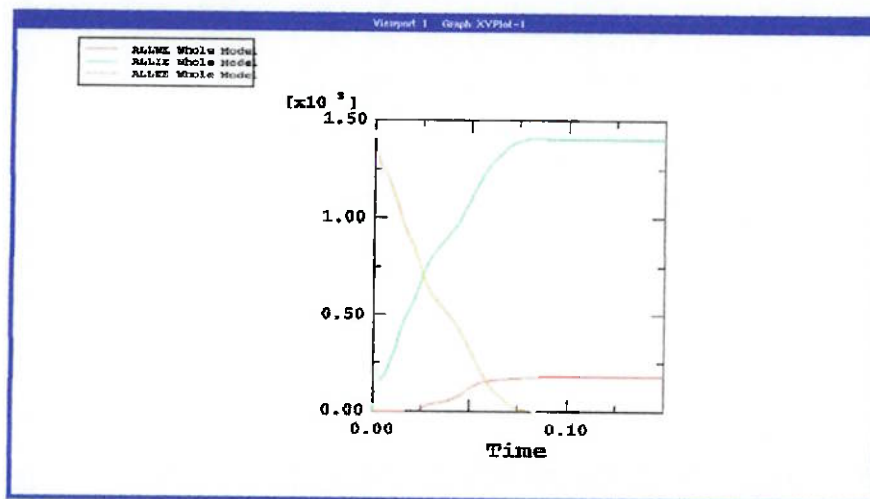


figura 23 (a) – gráfico de energia para escala unitária (simulação 1)

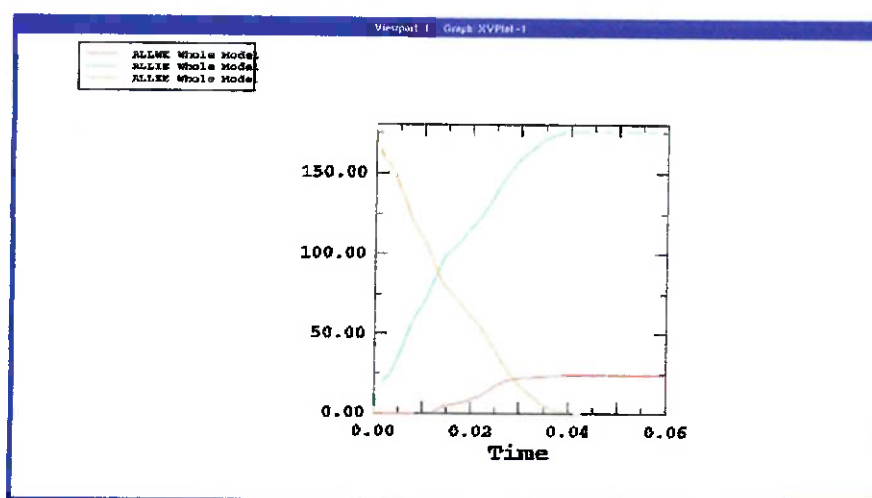


figura 23 (b) – gráfico de energia para escala $\frac{1}{2}$ e espessura escalonada (simulação 3)

Esses gráficos mostram um desenvolvimento similar das curvas de energia e um tempo de impacto para a peça não escalonada de $t \approx 0,075$ s e de $t \approx 0,037$ s para $\beta = \frac{1}{2}$, ou seja, o tempo atende à relação descrita em teoria:

além disso, a energia cinética também atende à relação entre modelo e protótipo:

$$(E_c)_{\text{modelo}} = \frac{1}{2} m_{\text{modelo}} v_{\text{modelo}}^2$$

$$(E_c)_{\text{protótipo}} = \frac{1}{2} m_{\text{protótipo}} v_{\text{protótipo}}^2$$

$$(E_c)_{\text{modelo}} = \beta^3 (E_c)_{\text{protótipo}}$$

Outro parâmetro que pode ser analisado é a tensão, que pode ser vista pelas *figuras 20 e 22*. As regiões de tensões máximas ocorrem em locais similares e a faixa de tensões no protótipo é de 6,5 a 248,1 MPa, enquanto que no modelo a faixa varia de 10,9 a 247,8 MPa, ou seja, pode-se considerar que as tensões são iguais, como previsto pela teoria.

Através destas observações das simulações 1, 2 e 3, pode-se concluir que se a espessura for escalonada, pode ser feita uma total similaridade entre modelo e protótipo. Porém, como descrito anteriormente, é difícil construir peças reais feitas de chapas com espessuras que obedeçam fielmente ao fator de escala, por isso seria importante a aplicação de teorias que permitam uma correção desse distúrbio, mas que não é o escopo deste trabalho. Outro fator a ser destacado é que a velocidade usada para essas simulações (3,8 m/s) pode ser considerada razoavelmente baixa, podendo a peça estar comportando-se de forma estática, além disso, alguns fatores como a taxa de deformação, não foram considerados no modelo. Esses fatores serão abordados nos próximos itens.

Os dados obtidos neste item também ajudam a validar o modelo, pois esses resultados já eram esperados. A peça tendo uma espessura maior tem a resistência e o momento de inércia da seção maiores, o que faz com que seja mais resistente e consiga absorver mais energia.

4.6.2 – Verificação do efeito da velocidade na Similaridade

Agora uma velocidade maior será utilizada para verificar o comportamento do protótipo e do modelo. Analisando de forma análoga ao item anterior usou-se uma velocidade de 30 m/s e massa de 3,209 kg para $\beta = 1$, obtendo-se os formatos finais para o protótipo (figura 24 (a)), modelo (figura 24 (b)) e respectivas curvas de energia (figuras 25 (a) e (b)):

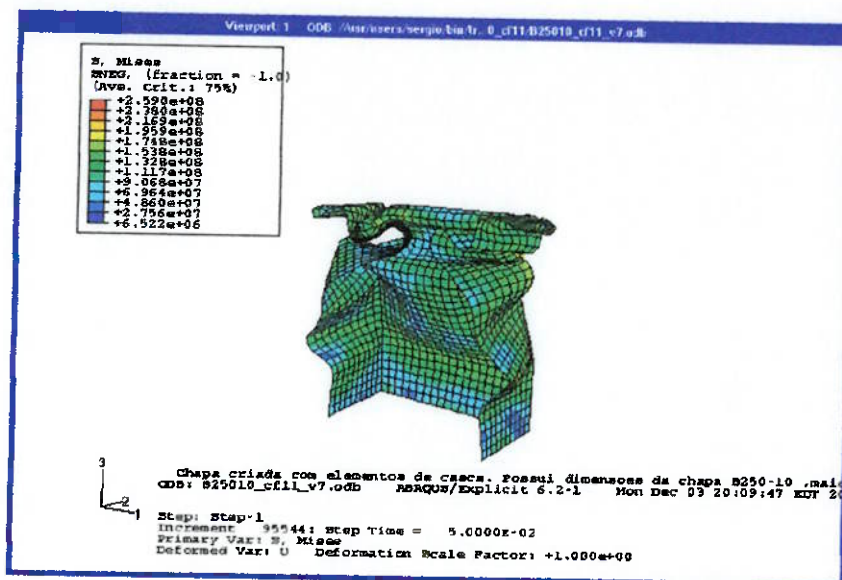


figura 24 (a) – formato final para escala unitária (simulação 4). Velocidade inicial 30 m/s e massa de impacto de 3,209 kg

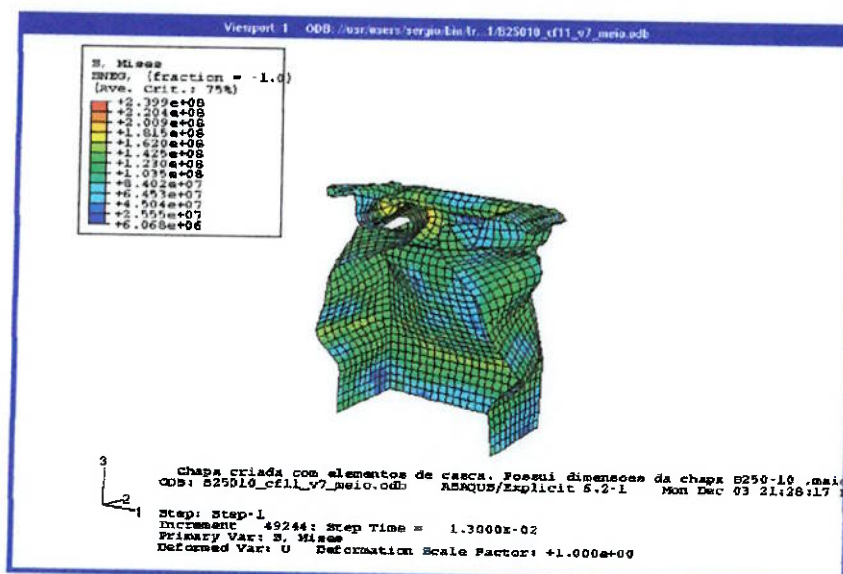


figura 24 (b) – formato final para escala $\frac{1}{2}$ (simulação 5). Velocidade inicial de 30 m/s e massa de impacto de 0,401 kg

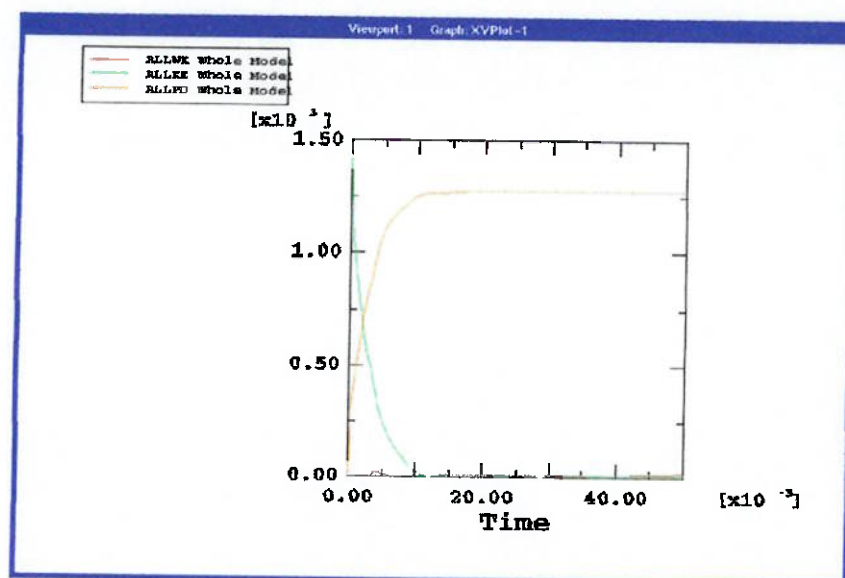


figura 25 (a) – gráfico de energia para escala unitária (simulação 4)

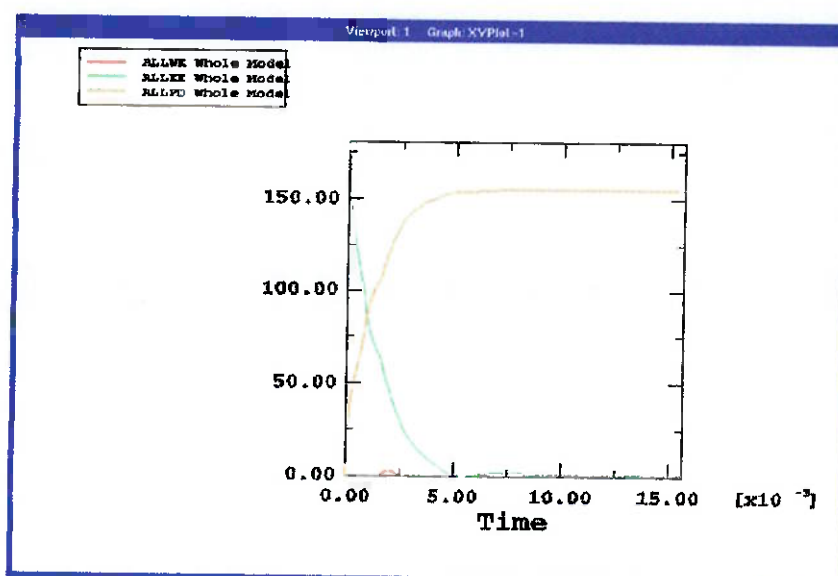


figura 25 (b) – gráfico de energia para escala $\frac{1}{2}$ (simulação 5)

Da mesma forma os resultados confirmam a similaridade entre modelo e protótipo para velocidade de 30 m/s, pois os formatos finais e tensões são análogos e o tempo de impacto é relacionado por um fator β .

4.6.3 - Verificação do efeito da taxa de deformação na Similaridade

Diferentemente dos itens anteriores, agora foi inserido o efeito da taxa de deformação no modelo utilizado para simulação. Por recomendação do orientador foi usado um equacionamento que revela uma taxa mais sensível que a do alumínio (material da qual a peça é composta) para que a influência da taxa fique mais visível, ou através da equação constitutiva de Cowper-Symonds:

$$\sigma_d = \sigma_0 \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{40} \right)^{1/4} \quad (5)$$

Primeiro foi usado uma velocidade de 30 m/s e massa de 3,209 kg (simulação 6) obtendo o formato final mostrado na figura 26:

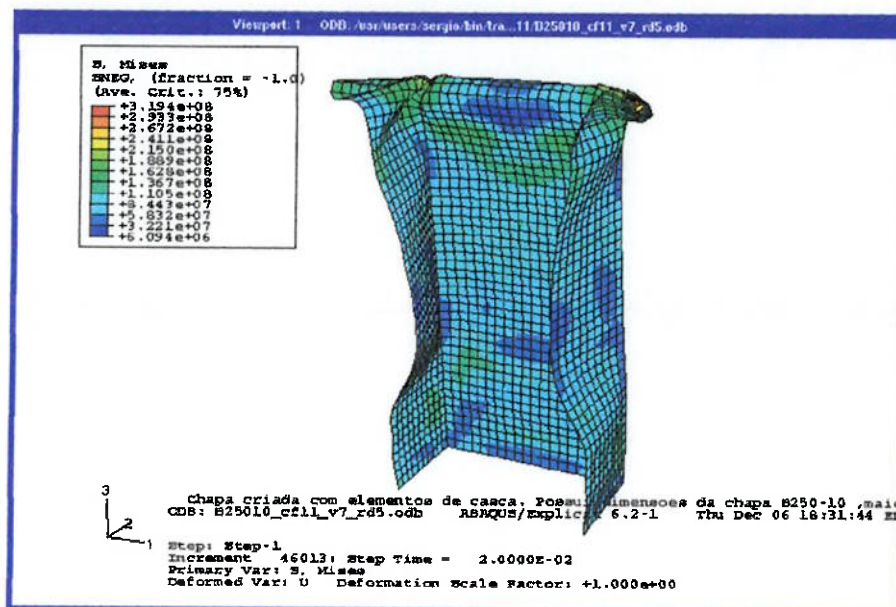


figura 26 – formato final considerando-se a taxa de deformação (simulação 6). Velocidade inicial de 30 m/s e massa de 3,209 kg

Para obter-se maiores deformações uma maior energia foi aplicada, para tanto a massa foi aumentada para 6 kg e a velocidade mantida em 30 m/s (simulação 7). Considera-se esse ensaio como fator de escala unitário:

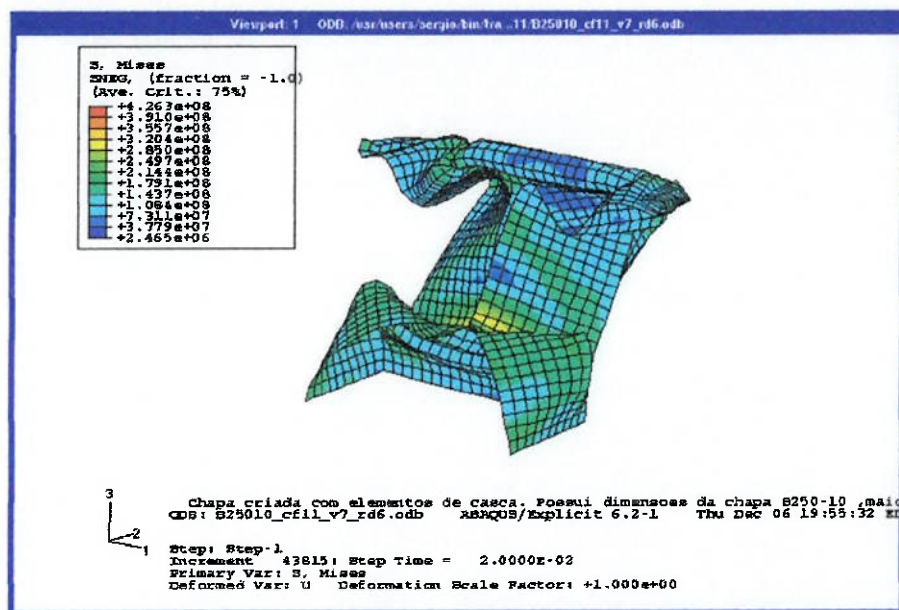


figura 27 – formato final considerando-se taxa de deformação e $\beta = 1$ (simulação 7). Velocidade inicial de 30 m/s e massa de impacto de 6 kg.

E o fator de escala $\frac{1}{2}$ foi aplicado (simulação 8) obtendo:

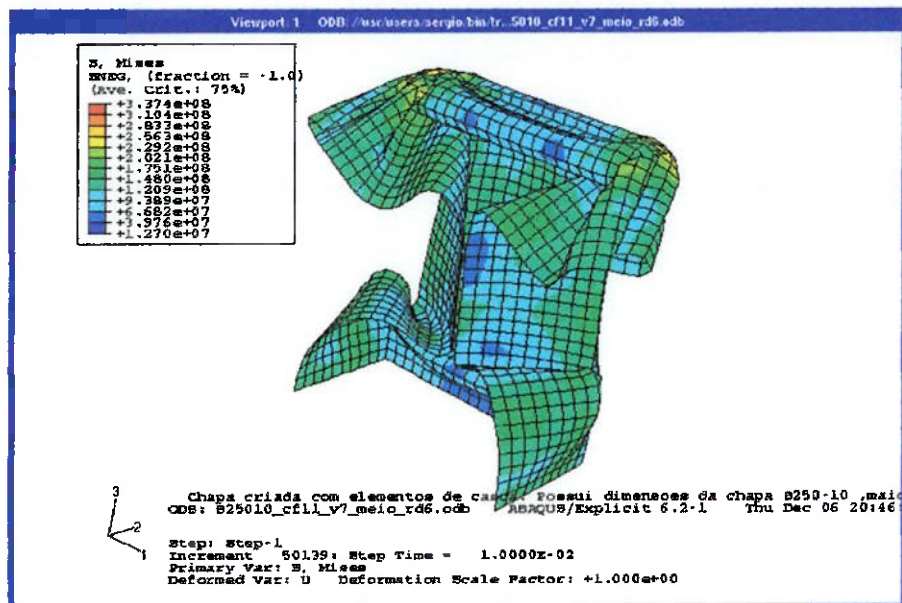


figura 28 – formato final considerando-se taxa de deformação e $\beta = \frac{1}{2}$ (simulação 8). Velocidade inicial de 30 m/s e massa de impacto de 0,75 kg.

Analisando a *figura 26* e comparando-a com a *figura 24 (a)* verifica-se que o efeito da taxa de deformação influencia no formato final. Como previsto, a peça torna-se mais resistente devido ao efeito da taxa e portanto deforma-se menos. Comparando

agora as *figuras 27 e 28* é observado que a taxa também altera a Similaridade das peças pois:

$$\dot{\varepsilon}_{\text{protótipo}} = \frac{\varepsilon_{\text{protótipo}}}{t_{\text{protótipo}}}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{modelo}} = \frac{\varepsilon_{\text{modelo}}}{t_{\text{modelo}}} = \frac{\varepsilon_{\text{protótipo}}}{(\beta)t_{\text{protótipo}}}, \text{ logo:}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{modelo}} = \frac{1}{\beta} \dot{\varepsilon}_{\text{protótipo}}$$

usando a *eq.5* e o fato de $(\sigma_0)_{\text{modelo}} = (\sigma_0)_{\text{protótipo}}$, obtém-se a relação

$$\frac{(\sigma_d)_{\text{modelo}}}{(\sigma_d)_{\text{protótipo}}} = \frac{1 + (\dot{\varepsilon}/\beta D)^{1/q}}{1 + (\dot{\varepsilon}/D)^{1/q}} \quad (6)$$

e dessa maneira a Similaridade fica incompleta pois essa equação não atende à condição de igualdade entre tensões imposta no item 4.4.2.11.

Ainda, observando-se as *figuras 27 e 28*, nota-se uma semelhança até um certo ponto, mas depois o modelo não dobra para trás como aconteceu como no protótipo. A menor deformação do modelo pode ser explicado exatamente por sua maior tensão dinâmica de escoamento conforme a *eq. (6)* demonstra.

Através das curvas de energia das *figuras 29 e 30*, respectivamente para as simulações 7 e 8, pode ser visto que a relação de tempo se relaciona pelo fator $\frac{1}{2}$, o que atende à condição imposta no item 4.4.2.11:

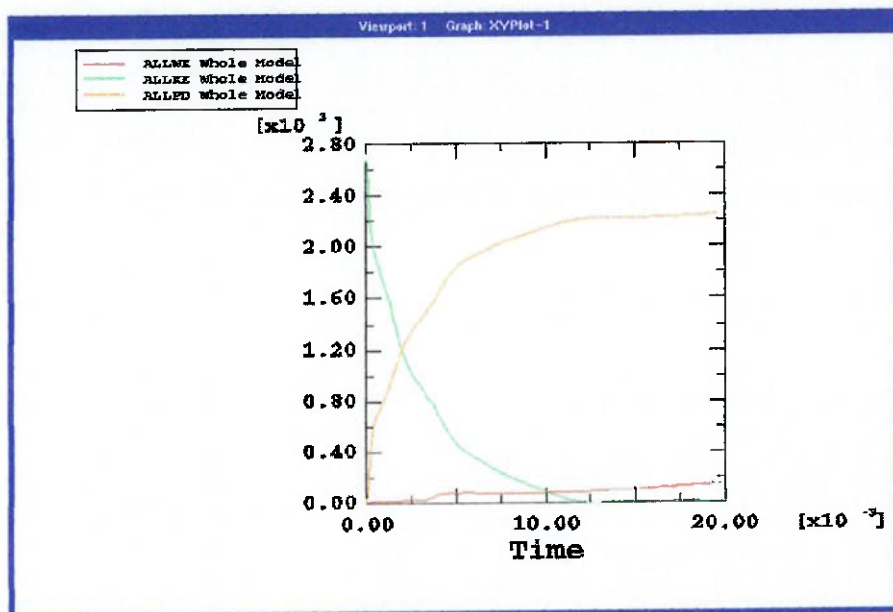
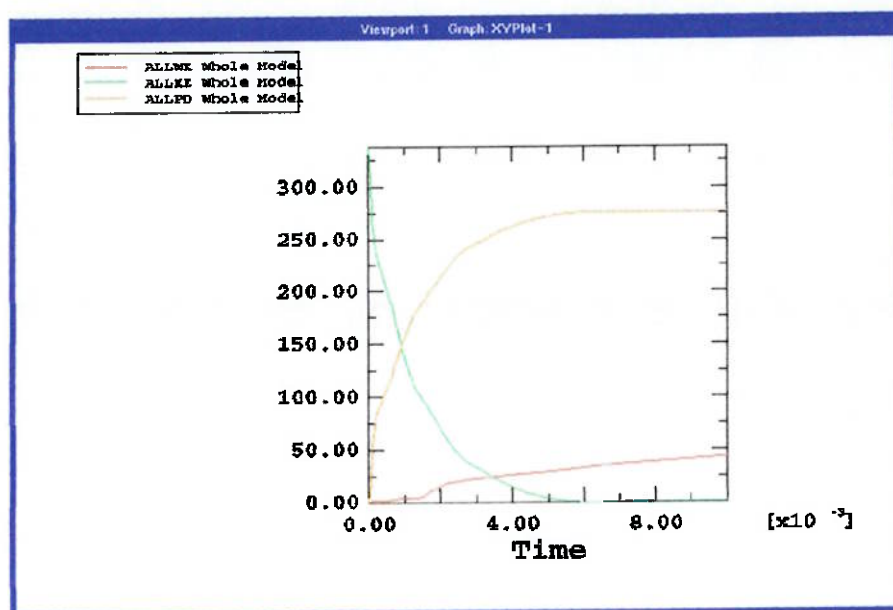


figura 29 – curva de energia para fator de escala unitário (simulação 7)

figura 30 – curva de energia para fator de escala $\frac{1}{2}$ (simulação 8)

Dessa maneira pode-se concluir que a peça mesmo não tendo semelhança completa, segue o mesmo padrão de forma e atende a todos os parâmetros com exceção das tensões.

5 – DISCUSSÃO

Os resultados obtidos mostram que uma forma de flambagem não descrita ainda pela teoria se desenvolveu durante as simulações, sendo esta nem progressiva nem global. Uma nova fonte de classificação seria aí necessária para essa zona de transição. Ainda, para este tipo de perfil não existe uma única faixa de transição como já foi observado anteriormente, mostrando-se um fenômeno mais complexo do que o impacto axial em perfis cilíndricos.

Em relação à similaridade, a teoria clássica dos Pi de Buckingham não permite que protótipo e modelo sejam completamente similares a não ser que a espessura seja também escalonada. Porém existem teorias mais complexas que permitem que ajustes possam ser feitos a fim de obter similaridade quando não é possível obter modelos completos devido à restrições de ordem física.

Além das consequências das formas de flambagem observadas neste trabalho na absorção de energia, outros aspectos devem ser levados em consideração, como a possibilidade de utilização do perfil aberto na redução de peso e de volume (permitindo, por exemplo, passagem de componentes elétricos nos veículos automotores), reduzindo custos de fabricação e gerando economia de energia.

Existe ainda a necessidade de analisar a influência do método de fabricação (perfis extrudados ou dobrados) no desenvolvimento do fenômeno. Isso se torna importante, considerando que a curva de tensão-deformação nas regiões próximas às dobras possui um comportamento distinto em virtude do processo de fabricação utilizado.

Com relação ao modelo utilizado nas simulações, ele se mostrou confiável, pois resultados obtidos nos itens 3.3.1 e 4.6 mostraram coerência. O programa que descreve o modelo permite que se faça variações nos parâmetros como velocidade inicial, dimensões da peça, massa de impacto, condições de contorno, número de

elementos utilizados com uma razoável facilidade, dando a ele portanto, grande versatilidade.

O trabalho aqui descrito pode ainda ser desenvolvido com mais detalhes e obter resultados mais precisos e abrangentes, mas exigindo para isso, muito mais tempo e trabalho. Como ponto negativo faltou como complemento uma parte empírica (ensaios reais) que comprovassem os resultados aqui obtidos. Inicialmente estes ensaios estavam previstos, inclusive com um conjunto de peças de várias dimensões já prontas para serem impactadas, mas devido a problemas no Laboratório de Impacto da Poli, estes testes não puderam ser feitos.

6 – CONCLUSÕES

Como previsto no início do desenvolvimento deste trabalho, tivemos a comprovação de que o estudo de impacto em perfis abertos possui um amplo campo de pesquisa a ser explorado. Pudemos observar a complexidade do fenômeno, e a ocorrência de modos de flambagem não existentes em publicações do gênero. Utilizando como base os estudos realizados por nosso orientador para perfis fechados de seção circular e quadrada, os resultados mostram que a definição do ponto de transição da flambagem global para a progressiva em função da energia e dos valores de massa e velocidade pode ser realizado, porém com a necessidade da inclusão dessas outras formas de flambagem citadas, que demandam tempo e recursos para serem estudadas e compreendidas. A utilização dos números adimensionais mostrou-se eficiente e uma valiosa ferramenta de auxílio, porém torna-se necessário um estudo mais aprofundado da influência das velocidades de onda, material, taxa de deformação, e de outras variáveis, de modo a fornecer subsídios para a aplicação e uso desse tipo de perfil em estruturas mecânicas.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KARAGIOZOVA D.; ALVES M.; JONES N. Inertia effects in axisymmetrically deformed cylindrical shells under axial impact. **International journal of impact engineering**, 2000.
- [2] JONES, N. **Structural Impact**. Cambridge: Cambridge University Press/ Cambridge: 1989. Cap.9., p.431-385: Dynamic progressive buckling. Cap.11., p.520-489: Scaling laws.
- [3] SINGER J.; ARBOCZ J.; WELLER T. **Buckling experiments: Experimental methods in buckling of thin-walled structures**. Chichester: John Wiley & Sons/Chichester: 1998. v.1. Cap.5., p.287-217: Modeling – Theory and Practice.
- [4] FOX,R.W.; MCDONALD A.T. **Introdução à mecânica dos fluídos**. Rio de Janeiro: LTC: 1998. Cap. 7., p. 252-227: Análise dimensional e semelhança.
- [5] ABAQUS/ Explicit User's Manual – version 6.2. Michigan: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc: 2001. v1 e v2
- [6] ABAQUS/ Standard User's Manual – version 6.2. Michigan: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc: 2001. v1, v2 e v3.
- [7] ABAQUS Keywords Manual – version 6.2. Michigan: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc: 2001.
- [8] ABAQUS/ Viewer User's Manual – version 0. Michigan: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc: 2001.

8 – ANEXOS

8.1 – Anexo A programação

**HEADING*

Esse input foi escrito para a versão 6.2.1 do programa ABAQUS/Explicit.

Chapa criada com elementos de casca e composto por 2000 elementos. Possui dimensões da família de perfis B250 (descrito no item 2.2.) e carga dinâmica de impacto. As constantes do material foram retiradas do gráfico 12.

Massa de impacto criada com elementos rígidos e composta por 121 elementos (11 x 11). Possui dimensões do martelo de queda livre disponível no laboratório de grandezas mecânicas da POLI-USP.

Base de impacto criado com um único elemento rígido.

Massa total de impacto = 200 Kg

Velocidade inicial = 3.8 m/s (equivalente a uma queda de 0.722m)

Energia inicial: 1444 J

Condições de contorno:

Contato inferior com o solo = engastado

Contato superior com o martelo = atrito de 0.25

Contato próprio da peça = atrito de 0.25

Contato da lateral da peça com o solo e com o martelo = atrito de 0.25

Total de elementos : 2222

**PREPRINT,ECHO=NO,MODEL=NO,HISTORY=NO,CONTACT=NO*

**NODE,SYSTEM=R,NSET=bordas1*

1, 0., 0., 0.

51, 0., 0., 0.25

1001, 0., 0.05, 0.

1051, 0., 0.05, 0.25

**NODE,SYSTEM=R,NSET=bordas2*

3001, 0.1, 0.05, 0.

3051, 0.1, 0.05, 0.25

4001, 0.1, 0., 0.

4051, 0.1, 0., 0.25

**NODE*

2, 0., 0., 0.005

50, 0., 0., 0.245

1002, 0., 0.05, 0.005

1050, 0., 0.05, 0.245

3002, 0.1, 0.05, 0.005


```

3050 , 0.1 , 0.05 , 0.245
4002 , 0.1 , 0. , 0.005
4050 , 0.1 , 0. , 0.245
*NGEN,NSET=base
1,1001,100
1001,3001,100
3001,4001,100
*NGEN,NSET=topo
51,1051,100
1051,3051,100
3051,4051,100
*NGEN,NSET=basei
2,1002,100
1002,3002,100
3002,4002,100
*NGEN,NSET=topoi
50,1050,100
1050,3050,100
3050,4050,100
*NFill,NSET=pecai
basei,topoi,48,1
*NSET,NSET=peca
base,topo,pecai
*ELEMENT,TYPE=S4R,ELSET=basico
1,1,2,102,101
*ELGEN,ELSET=elpec
1,50,1,1,40,100,50
*MATERIAL,NAME=STEEL
*ELASTIC
767.E+8, 3.3E-1
*PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
138.E+6, .0
2613.E+5, 1.
*DENSITY
2.7E+3
*SHELL SECTION,ELSET=elpec,MATERIAL=STEEL
1.5E-3, 3
*BOUNDARY
base,ENCASTRE
*NODE
500001, -0.05 , -0.075 , 0.25
500101, -0.05 , 0.125 , 0.25
502101, 0.15 , 0.125 , 0.25
502001, 0.15 , -0.075 , 0.25
600001, -0.15 , -0.175 , 0.
600101, -0.15 , 0.225 , 0.
602101, 0.25 , 0.225 , 0.
602001, 0.25 , -0.175 , 0.

```

```

*NGEN, NSET=NRB1
500001,500101,10
*NGEN, NSET=NRB2
502001,502101,10
*NFill, NSET=NRB
NRB1, NRB2, 10,200
*NGEN, NSET=NRB3
500001,502001,200
*****
*NODE
50000, 0.05, 0.025, 0.25
60000, 0.05, 0.025, 0.
*****
** MALHA DA MASSA DE IMPACTO **
*****
*ELEMENT, TYPE=R3D4
500001, 500001,500201,500211, 500011
*ELGEN, ELSET=massa
500001, 10,200,1, 10,10,100
*RIGID BODY, ELSET=massa, REF NODE=50000
*****
** DEFINICAO DO VALOR DOS ELEMENTOS DE MASSA **
*****
*ELEMENT, TYPE=MASS
900001, 500001
*ELGEN, ELSET=Ma
900001, 11,200,1, 11,10,100
*MASS, ELSET=Ma
1.65
*****
** MALHA DA BASE DE IMPACTO **
*****
*ELEMENT, TYPE=R3D4, ELSET=apoio
600001, 600001, 602001, 602101, 600101
*RIGID BODY, ELSET=apoio, REF NODE=60000
*****
*BOUNDARY
50000, 1, 2
50000, 4, 6
60000, 1, 6
*****
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=VELOCITY
50000, 3, -3.8
*SURFACE, NAME=MASSA
massa, SNEG
*SURFACE, NAME=APOIO
apoio, SPOS
*SURFACE, NAME=PERFIL

```

```

elpec, SPOS
*SURFACE, TYPE=NODE, NAME=BASEP
base,
*SURFACE, TYPE=NODE, NAME=TOPOP
topo,
*SURFACE, TYPE=NODE, NAME=LATER
pecai,
*STEP
*DYNAMIC, EXPLICIT
, 1.E-1
*****
** CONTATO MASSA DE IMPACTO-TOPO DA PECA **
*****
*CONTACT      PAIR,      MECHANICAL      CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=SUPERIOR
TOPOP, MASSA
*SURFACE INTERACTION, NAME=SUPERIOR
*FRICTION
0.25
*****
** CONTATO BASE DE IMPACTO-BASE DA PECA **
*****
*CONTACT      PAIR,      MECHANICAL      CONSTRAINT=PENALTY,
INTERACTION=INFERIOR
BASEP, APOIO
*SURFACE INTERACTION, NAME=INFERIOR
*FRICTION
0.25
*****
** CONTATO MASSA DE IMPACTO-LATERAL DA PECA **
*****
*CONTACT PAIR, INTERACTION=SUP_LAT
LATER, MASSA
*SURFACE INTERACTION, NAME=SUP_LAT
*FRICTION
0.25
*****
** CONTATO BASE DE IMPACTO-LATERAL DA PECA **
*****
*CONTACT PAIR, INTERACTION=INF_LAT
LATER, APOIO
*SURFACE INTERACTION, NAME=INF_LAT
*FRICTION
0.25
*****
** CONTATO PROPRIO DA PECA **
*****
*CONTACT PAIR, INTERACTION=PROPRIO

```

PERFIL, PERFIL

**SURFACE INTERACTION, NAME=PROPRIO*

**FRICTION*

0.25

**DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL OVERCLOSURE=DETAIL, DEFORMATION
SPEED=DETAIL*

**OUTPUT, FIELD, VARIABLE=PRESELECT*

**OUTPUT, HISTORY, VARIABLE=PRESELECT*

**END STEP*

8.2 – Anexo B

informações do sistema

SYSTEM INFORMATION Compaq

Processor: alpha
Number of CPUS : 1 cpu
Operating System: Digital Unix V4.0 1229
ABAQUS release type: 64-Bit
C Level: DEC C V5.9-005 on Digital UNIX V4.0 (Rev. 1229)
X11 Level: OSFX11440 installed Basic X Environment
(Windowing Environment)
Graphics Board: COMET
Main Memory: 256.00 M