

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA VIA MEF DO PROCESSO DE
HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS DE ALUMINIO

Carlos Eduardo Célia de Lima

SÃO PAULO
2006

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA VIA MEF DO PROCESSO DE
HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS DE ALUMINIO

Trabalho de Formatura Apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia
Mecânica.

Carlos Eduardo Célia de Lima

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

SÃO PAULO
2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Lima, Carlos Eduardo Célia de
Simulação numérica via MEF do processo de hidroconformação de tubos de alumínio / C.E.C. de Lima. -- São Paulo, 2006.
48 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Processos de fabricação (Simulação numérica) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

Hidroconformação ou conformação hidrostática é um processo de fabricação que utiliza a fluido como meio de conformação. No caso do processo aplicado a tubos, um blank tubular é colocado entre duas matrizes, é selado e fluido hidráulico é introduzido a até 1200 MPa, obtendo-se a deformação da parede do tubo, conformando-o a forma da cavidade da matriz. O objetivo deste trabalho será estabelecer o entendimento básico do comportamento do processo de fabricação, assim como o comportamento do alumínio quando submetido à conformação hidrostática. Para a realização do trabalho será desenvolvida uma pesquisa bibliográfica para entender o processo de conformação e a metodologia de elementos finitos utilizada no trabalho. O trabalho prevê a modelagem das malhas e a simulação utilizando o programa comercial LS-Dyna em duas condições diferentes: na primeira simulação, será realizado o estudo da expansão hidrostática livre (sem matrizes e sem força axial). Na segunda, será estudado a hidroconformação de tubos em matrizes com punções. Os resultados apresentados são comparados com bibliografia existente. Palavras chaves: hidroconformação, MEF, tubos de alumínio, processo de fabricação, simulação.

ABSTRACT

Hydroforming is the fabrication process that uses a fluid medium to form a piece by using high internal pressure. In tube hydroforming, a tubular blank is placed between two dies, sealed and pressurized fluid up to 1200MPa is injected, deforming the tube walls in the cavity form of the dies. The main objective of this publication is to establish the basic understanding of this manufacturing process and the behavior of an aluminum tube when it is submitted to the hydroforming process. A bibliographic review of the aluminum alloys hydroforming and the simulation via FEM is made to help the progress of this work. Two models are made to simulate two different situations: for the first simulation, the hydroforming of a free aluminum tube without axial force and for the second one, the study of the hydroforming of a tube in a die. Both simulations were developed with the commercial software LS-DYNA and the results are presented and compared with the results of the references in the same conditions.

Keywords: hidroforming, FEM, aluminum tube, manufacturing process, simulation.

SUMÁRIO

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 7 |
| 2 | HYDROCONFORMAÇÃO DE CHAPAS..... | 8 |
| 2.1 | Hidroconformação de chapas:..... | 8 |
| 2.2 | Vantagens da hidroconformação: | 8 |
| 2.3 | Aplicações da hidroconformação:..... | 9 |
| 2.4 | Simulação do bulge test: | 9 |
| 2.5 | Experimento realizado:..... | 11 |
| 3 | PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS..... | 15 |
| 3.1 | Histórico [2]..... | 15 |
| 3.2 | Técnicas de Hidroconformação..... | 16 |
| 3.3 | Estados de deformação em peças hidroconformadas..... | 16 |
| 3.4 | Vantagens e desvantagens..... | 17 |
| 3.5 | Falhas do processo de hidroconformação. [2]..... | 17 |
| 4 | MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS [5]..... | 19 |
| 4.1 | Desenvolvimento..... | 19 |
| 4.2 | Problemas físicos e modelagem matemática..... | 19 |
| 4.3 | Conceitos básicos..... | 20 |
| 4.4 | Formulação dos elementos finitos..... | 21 |
| 4.5 | Métodos de integração: implícito e explícito. Abrantes e Junior [7]..... | 23 |
| 5 | SOFTWARE LS-DYNA [6]..... | 26 |
| 5.1 | Histórico..... | 26 |
| 5.2 | Aplicações [8]..... | 26 |
| 5.3 | Estruturação de arquivo de input..... | 28 |
| 5.4 | Algoritmos de contatos no LS-Dyna [11]..... | 30 |
| 6 | SIMULAÇÃO..... | 33 |
| 6.1 | Expansão Hidrostática Livre de Tubo..... | 33 |
| 6.1.1 | Modelagem MEF da expansão hidrostática livre de tubos..... | 34 |
| 6.1.2 | Condições de Contorno para Modelo MEF da expansão hidrostática livre de tubos..... | 35 |
| 6.1.3 | Propriedades do material e condições de processo de expansão hidrostática livre..... | 36 |
| 6.1.4 | Resultados da modelagem MEF da expansão hidrostática livre de tubos..... | 37 |
| 6.2 | Expansão Hidrostática de Tubos em matriz fechada..... | 38 |
| 6.2.1 | Propriedade, geometria e condição de hidroformagem de tubo em matriz fechada..... | 39 |
| 6.2.2 | Modelagem pelo MEF da hidroformagem de tubos em matriz fechada.... | 41 |
| 6.2.3 | Resultados da simulação MEF para hidroformagem de tubos em matriz fechada..... | 42 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 44 |
| ANEXO A | – “CARTA” LS-DYNA..... | 45 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 48 |

1INTRODUÇÃO

Atualmente uma das grandes preocupações na indústria automobilística européia é com relação às leis ambientais que restringem os níveis de emissão dos veículos e que estão ficando cada vez mais severas. A solução que requer menos investimento e que tem sido a mais explorada é projetar veículos leves, conseqüentemente busca-se reduzir o peso da estrutura do veículo sem que haja o comprometimento da integridade estrutural da mesma. Existem duas formas de se obter estruturas mais leves: mudando o material ou mudando o processo de fabricação.

Com relação aos materiais aplicados, uma das tendências atuais é a utilização de alumínios especiais na substituição dos aços em veículos. Neste caso alguns aspectos importantes são levados em conta, por exemplo, o design das peças do veículo deve ser alterado para manter valores aceitáveis de rigidez.

Processos de manufatura convencionais vêm sendo modificados e melhorados e novos processos têm sido criados para atender essas necessidades.

Este trabalho junta as duas coisas, já que estuda um processo de conformação relativamente antigo, mas que só está sendo implantado nas indústrias agora, aliado com o alumínio que apresenta um comportamento mecânico completamente diferente dos aços e, portanto deve ser estudado de forma diferenciada.

Em paralelo esse trabalho apresenta um estudo sobre o processo de hidroconformação de chapas analisado do ponto de vista experimental e numérico.

As vantagens da hidroconformação sobre o processo tradicional são:

- a) Redução de peso;
- b) Aumento da flexibilidade do projeto, tornando possíveis novas formas de peças;
- c) Aumento da rigidez devido à obtenção de peças tubulares contínuas sem solda;
- d) Eliminação de regiões unidas por solda ou outros tipos de uniões;
- e) Melhora da repetibilidade dimensional.

Este trabalho busca iniciar um estudo do processo de hidroconformação de tubos com esforço radial que ocorre na expansão hidrostática livre, sem matrizes e também a hidroconformação de tubos em matrizes. Sendo assim, neste primeiro trabalho, pretende-se calibrar o software de simulação, LS-DYNA, que será utilizado nestes estudos. Para atingir este objetivo, os resultados obtidos por Imaninejad et al. (2004) [1] será utilizado para efeito de comparação.

2 HYDROCONFORMAÇÃO DE CHAPAS

Este capítulo apresenta um estudo prévio sobre o processo de hidroconformação de chapas que é considerado fundamental para o estudo do processo de hidroconformação de tubos. Um experimento simples de “bulging” também conhecido como ensaio de Nakajima, mas neste caso sem punção e com pressão hidrostática é realizado para melhorar nosso entendimento sobre o processo e uma simulação numérica também é apresentado.

Um sistema de aquisição foi montado para podermos controlar o processo e registrar as curvas de pressão e deslocamento. A pressão é regulada através de uma bomba manual.

2.1 Hidroconformação de chapas:

O processo de hidroconformação de chapas se assemelha ao processo de embutimento. A principal diferença é a substituição do punção pela ação da pressão hidráulica de um fluido (óleo hidráulico ou emulsão de água). Desta forma a chapa é deformada dentro de uma matriz pela ação do fluido em pressão controlada. A forma final da chapa é determinada pelo perfil do punção.

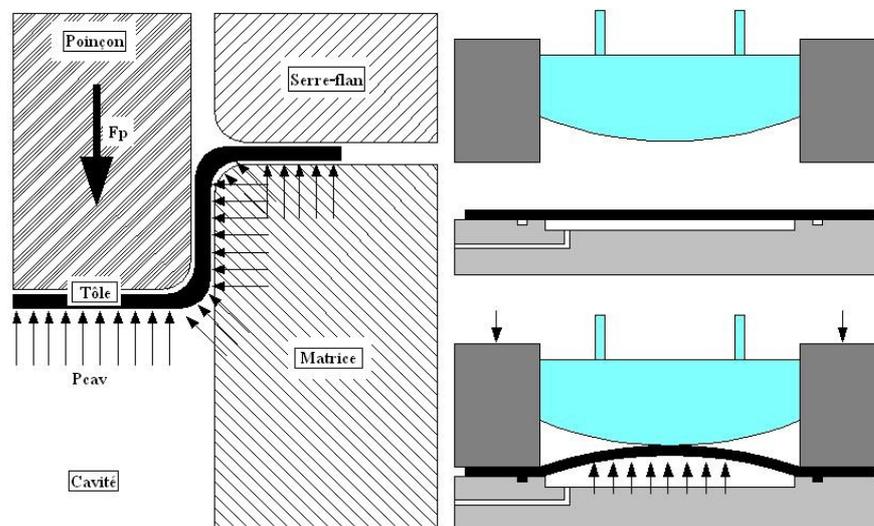


Figura 2.1 – Esquemas representativos do processo de hidroconformação.

2.2 Vantagens da hidroconformação:

Quando comparamos o processo de hidroconformação com outros processos tradicionais de fabricação equivalentes, encontramos produtos com custos baixos, peso reduzido e uma melhor integridade estrutural, pois podemos aplicar altas forças de embutimento com ferramentais de gabarito reduzido, obtendo assim um preço

reduzido de ferramental (redução de até 80% em comparação as prensas convencionais).

2.3 Aplicações da hidroconformação:

Este processo já é muito utilizado nas indústrias automotivas e aeronáuticas mas existe uma flexibilidade para a realização de protótipos e peças em pequenas séries, portanto este estudo é importante para facilitar o desenvolvimento do processo para os diferentes tipos de indústria.

2.4 Simulação do *bulge test*:

O *bulge-test* é um processo onde preenchemos uma cavidade com um fluido sob pressão, permitindo que a chapa se deforme livremente em uma matriz como mostrado pelo esquema da figura 2.4.1.

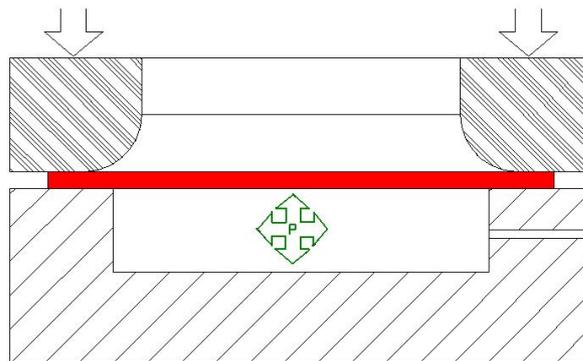


Figura 2.4.1 – Esquema do *bulge-test*.

Para melhor compreendermos esse processo, realizamos simulações numéricas através do método de elementos finitos através do software LS-Dyna.

Neste trabalho apresentamos um modelo simples para compreender o processo mas que poderá ser mais elaborado e confiável em atividades futuras.

A primeira etapa da simulação foi a criação da geometria através de um software de CAD, neste caso SolidWorks. Como o problema é simétrico podemos desenhar apenas um quarto da geometria de acordo com a figura 2.4.2.

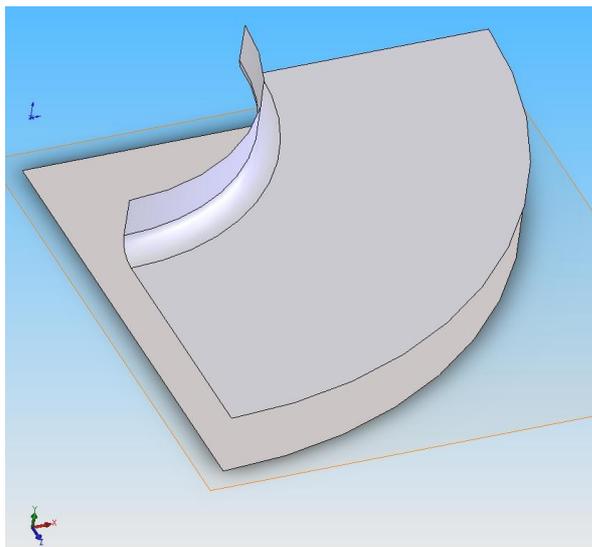


Figure 2.4.2 – CAD obtido com SolidWorks para a simulação.

Em seguida criamos a malha utilizando o software LS-Prepost. A malha contém 1216 elementos e 1312 nós (figura 2.4.3)

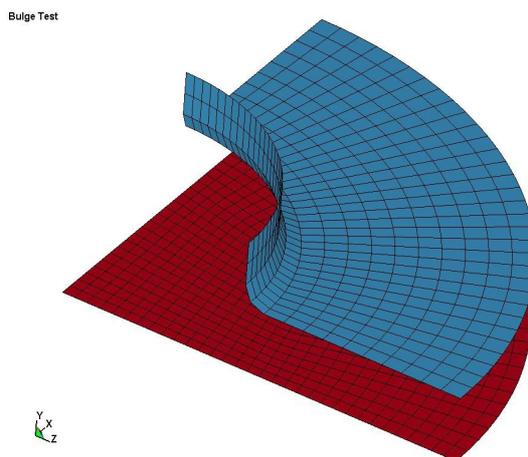


Figura 2.4.3 – Malha da matriz e da chapa para a simulação do *bulge-test*.

A carta de dados de entrada para o LS-Dyna também é criada com o software LS-Prepost, onde definimos todas as características do nosso modelo. Primeiramente definimos cada peça, os tipos de elementos, os comandos de controle e database, os parâmetros de contato, a curva de aplicação de esforço assim como a definição da região de aplicação de pressão e por fim as propriedades e leis de comportamento de material para cada peça.

Como este modelo é simples e ilustrativo para mostrar o que é possível através da simulação numérica, definimos a chapa com uma lei de comportamento de material elástico e a matriz com comportamento rígido. A matriz é encastrada, assim como os nós exteriores da chapa para evitar a modelagem da matriz inferior. Para

representarmos as condições de simetria, configuramos os nós localizados nos eixos de simetria.

Após configurarmos todos os parâmetros, lançamos o cálculo com o software LS-Dyna e observamos os resultados.

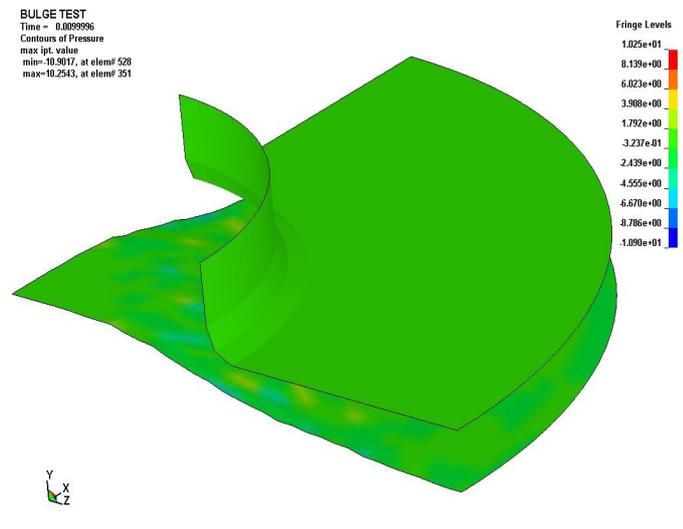


Figura 2.4.4 – Resultado da simulação e o contorno de pressão.

Para obtermos um modelo mais próximo da realidade, algumas modificações devem ser implementadas nesta simulação. A primeira seria a troca do modelo de comportamento da chapa para uma lei que leve em conta a plastificação, por exemplo, poderíamos utilizar a lei exponencial de Holomon. Um outro fenômeno que deve ser levado em conta é o atrito entre a chapa e a matriz. Neste caso, deveríamos modelar a matriz inferior e liberar os nós exteriores da chapa para que eles deslizassem em direção ao centro.

2.5 Experimento realizado:

O ferramental utilizado foi construído para fins acadêmicos e foi construído prevendo o fácil posicionamento dos sensores de pressão, apresenta boa rigidez e um suporte para posicionar os sensores de deslocamento. Na seqüência podemos ver o desenho em CAD da ferramenta e uma foto já com os sensores instalados e um reservatório para fluido hidráulico.

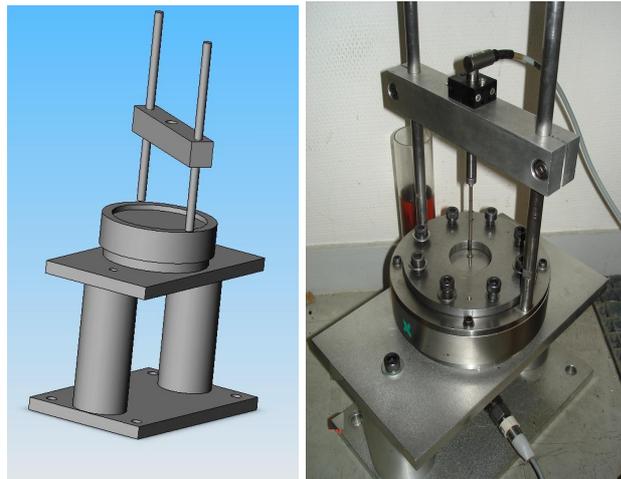


Figure 2.5.1 – CAD e foto do ferramental utilizado.

A fixação da chapa é feita através de parafusos e temos como escolha matrizes diferentes, de formatos circulares e ovais com diferentes diâmetros, permitindo assim maior flexibilidade de ensaios.

Para realizarmos as medições e controlarmos o processo utilizamos um sistema de aquisição com sensores HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik):

- sensor de deslocamento indutivo standard HBM WA/50mm com sensibilidade de 80mV/V e saída entre 0-10V
- e um sensor de pressão absoluta HBM P8AP/500bar com sensibilidade de 2mV/V e saída entre 0-10V

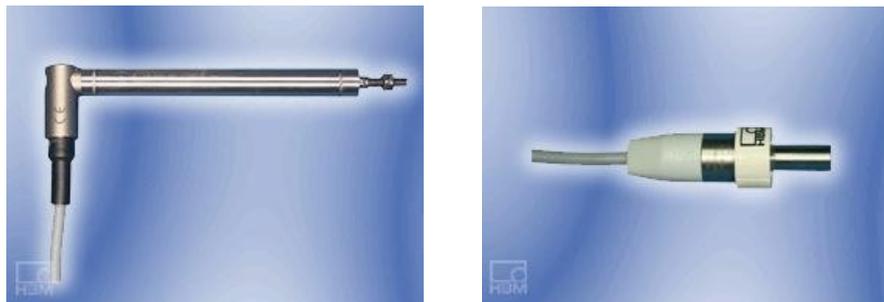


Figura 2.5.2 – Sensores HBM utilizados.

A aquisição é realizada com um sistema universal de medição numérica multi-canais SPIDER 8 que é conectada a um computador com o software de aquisição CatmanEasy instalado.



Figura 2.5.3 – Caixa de aquisição.

Este sistema nos permite obter uma curva de deslocamento (altura do domo) em função da pressão hidráulica a fim de caracterizar o material estudado.

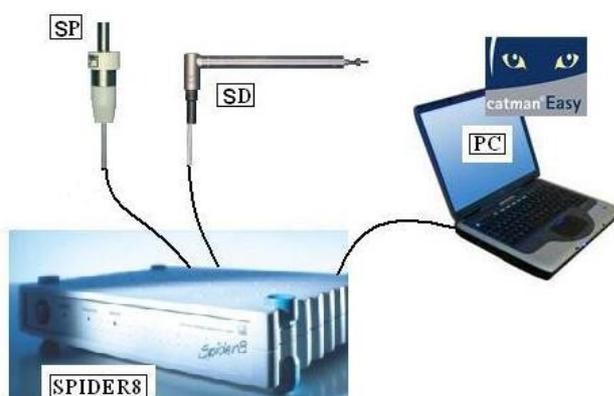


Figura 2.5.4 – Esquema da instalação.

Para os primeiros ensaios realizados utilizamos uma bomba manual:



Figure 2.5.5 – Bomba manual.

Realizamos dois ensaios, utilizando uma matriz de 50mm de diâmetro. Entre a matriz e a chapa, posicionamos um anel elástico para evitar vazamentos. Em seguida fechamos a matriz com parafusos e lançamos o software para registrar as curvas de

deslocamento e pressão. A bomba manual possui um manômetro para que possamos visualizar a pressão e verificar a aquisição, validando assim o sistema de aquisição. Para iniciar o ensaio, viramos o fuso trapezoidal aumentando a pressão manualmente. O primeiro ensaio realizado com uma chapa de cobre de 0,1mm de espessura chegou a 30bars de pressão. A chapa foi deformada plasticamente e obtivemos um domo de 7mm de altura.

O segundo ensaio foi realizado com um chapa de aço inox de 1mm de espessura, A pressão estava em 130 bares quando observamos um problema no fechamento da matriz e o ensaio foi abortado por uma questão de segurança. A chapa esteve todo o tempo na região elástica portanto não pudemos observar resultados.

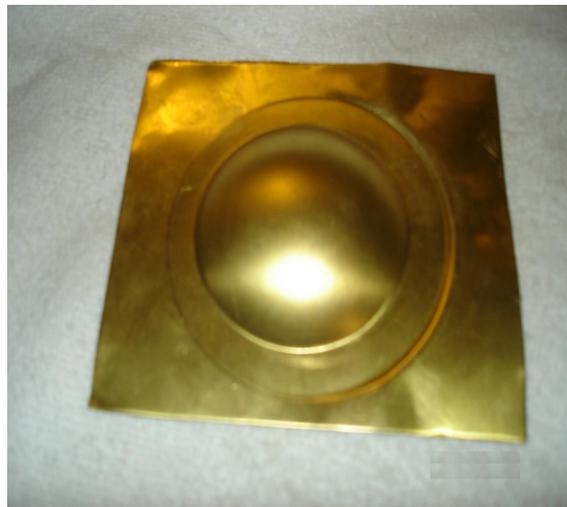


Figura 2.5.6 - Chapa de cobre hidroformada.

3 PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS

O processo de conformação hidrostática de tubos consiste na aplicação conjunta de esforços de compressão (axial e radial) e pressão interna (gerada por fluido hidráulico) a fim de se obter peças tubulares com seções transversais diferentes.

A peça (tubo extrudado) é colocada no interior de uma matriz que possui a forma final desejada. A matriz é fechada e dois pistões (punções) laterais comprimem axialmente o tubo. Na instalação do ferramental existem pontos de injeção de fluido hidráulico (água) através dos punções, que são selados ao tubo, e geram a pressão interna. As atuações da força axial, combinada com a força radial do fluido conformam o tubo no formato desejado. A figura 3.1 mostra o processo.

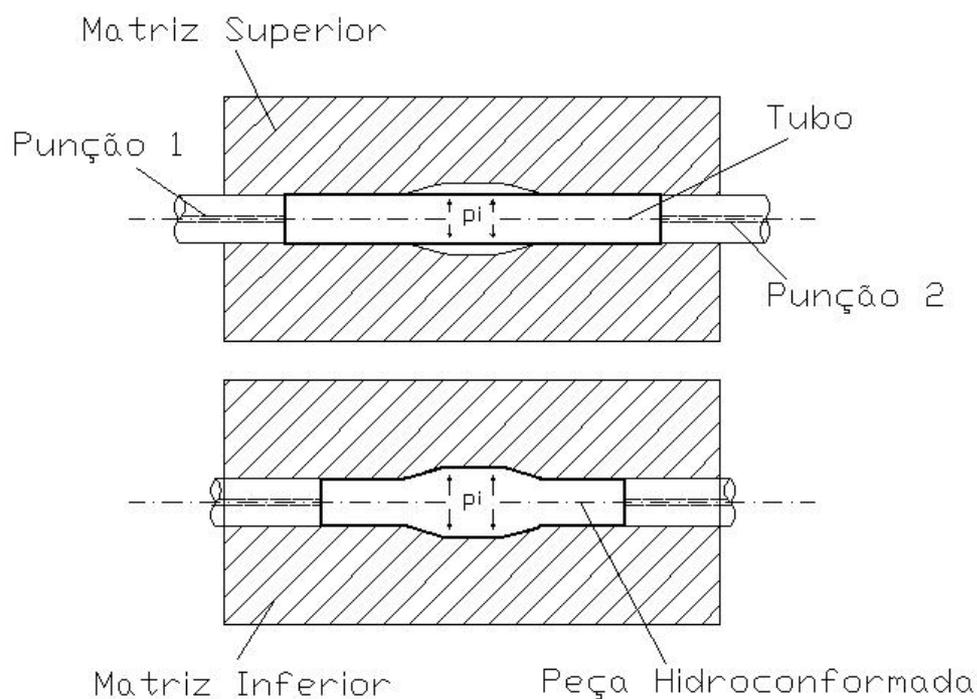


Figura 3.1 – Processo de Conformação de Tubos

A hidroconformação é um processo de fabricação utilizado principalmente pelas indústrias automobilística e aeronáutica para a produção de produtos em larga escala, de baixo custo, com peso reduzido e com maior integridade estrutural quando comparado com processos convencionais de conformação.

3.1 Histórico [2]

O início dos estudos se deu na década de 40, com a finalidade de aplicar o processo na produção de peças para sistemas hidráulicos, utilizando como material o cobre.

Ao longo do desenvolvimento do processo, poliuretano, borracha e elastômeros foram utilizadas para fornecer a pressão interna de conformação e novos arranjos ferramentais foram utilizados.

Na década de 80, outros materiais passaram a serem conformados, entre eles, o cobre, o latão e o alumínio que é assunto nesse trabalho.

Na década de 90, os métodos de elementos finitos começaram a ser utilizado nos estudos da hidroconformação a fim de identificar falhas no projeto ferramental antes de fabricá-lo.

3.2 Técnicas de Hidroconformação

De acordo com Morphy (2002) [3], atualmente se destacam duas técnicas de hidroconformação: a hidroformagem com pressurização seqüenciada, PSH (pressure sequence hydroforming) e a hidroformagem sob alta pressão, HPH (high-pressure hydroforming).

Ambas as técnicas foram desenvolvidas para facilitar a conformação de peças mais complexas prevenindo problemas de enrugamento, flambagem e ruptura. Apesar dos nomes fazerem referência a pressão, a verdadeira diferença entre as duas técnicas não está relacionada com a forma de se aplicar pressão e sim em como o blank é posicionado na matriz. A pressão final é consequência do arranjo montado e não se deve confundir o nível de pressão com potencial de conformação da peça e obtenção de peça sem defeitos. Na primeira parte deste estudo, a expansão hidrostática livre não se utiliza nenhum dos processos especificamente, já que não se levam em conta esforços de compressão realizados pela matriz. Porém pelo nível de pressão atingido pode-se dizer que se trata de HPH.

3.3 Estados de deformação em peças hidroconformadas

Uma peça submetida hidroconformação está sujeita aos mesmos estados de deformação presente em produtos estampados. A região das extremidades está sujeita a compressão enquanto a pressão interna tenta aumentar seu diâmetro. Na região de conformação ocorre tração e compressão na parede, enquanto que a espessura também é comprimida. Na parte superior, região com maiores deformações, ocorre um estado de tração biaxial e compressão no sentido da espessura.

3.4 Vantagens e desvantagens

Além das vantagens já mencionadas, vale destacar que em processos de conformação ocorre a redução no número de etapas do processo de produção, conseqüentemente reduzindo tempo e custo. Com a melhora da repetibilidade, reduz-se a quantidade de refugo e podem-se obter faixas de tolerâncias dimensionais mais estreitas.

Como desvantagens temos que a matriz tem alto custo pela complexidade e nível de detalhes e devido a isso o projeto das matrizes também se torna mais complicado. Com relação ao equipamento, deve-se garantir a boa vedação para não perder potencial de pressão. Além disso, as peças hidroconformadas estão sujeitas a falhas que serão detalhadas a seguir.

3.5 Falhas do processo de hidroconformação. [2]

Durante o processo de hidroconformação alguns tipos de defeitos podem surgir caso os parâmetros de processo não estejam bem ajustados. Basicamente, três tipos de defeitos podem ocorrer no processo. A figura 3.5.1 demonstra os três defeitos:

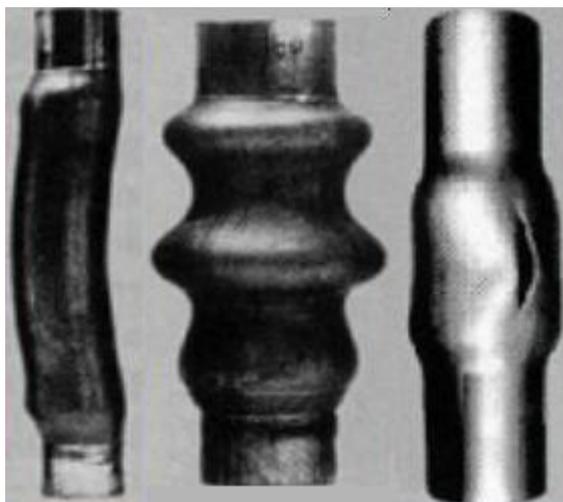


Figura 3.5.1 – Defeitos: flambagem, enrugamento e ruptura.

O tubo corre risco de flambar caso a pressão interna seja baixa de tal forma que não consiga compensar a alta força axial. Esse é o mesmo motivo pelo qual ocorre o enrugamento do tubo. Por outro lado, caso a pressão interna do fluido seja excessivamente alta o tubo pode não resistir e vir a falhar (ruptura).

Uma das áreas mais pesquisadas ultimamente são as chamadas janelas de processo. Estas janelas buscam identificar as faixas operacionais (relação força axial e pressão interna) em que não ocorrem os defeitos de tal forma a determinar os limites. A figura 3.5.2 mostra uma representação de janela de processo.

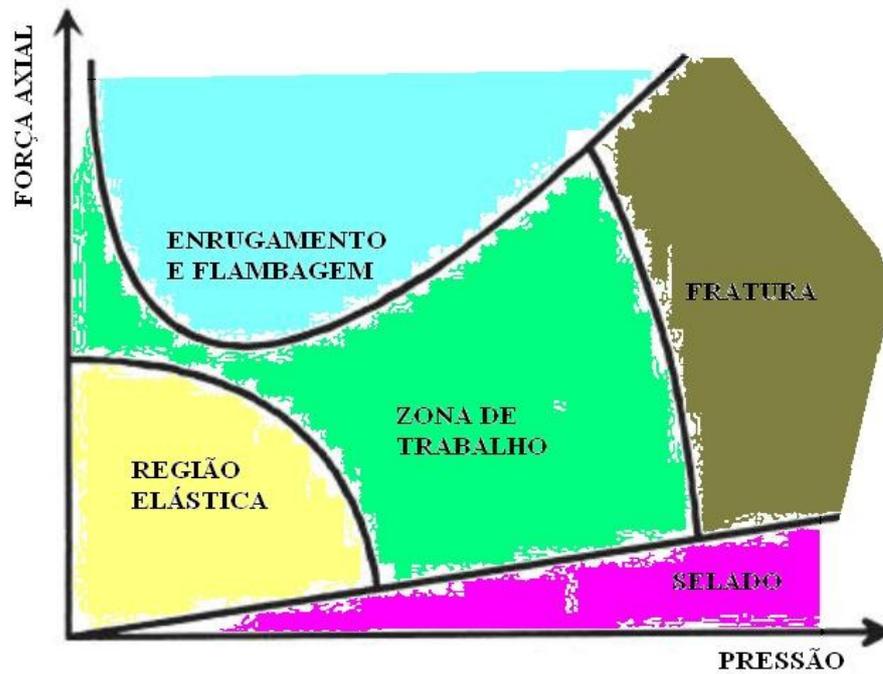


Figura 3.5.2 – Janela de Processo

Em estudo recente, Rachik [4], estabelece uma janela de processo experimentalmente para um teste de expansão oval. A figura 3.5.3 mostra essa janela, com o objetivo de mostrar como uma janela de processo real se parece.

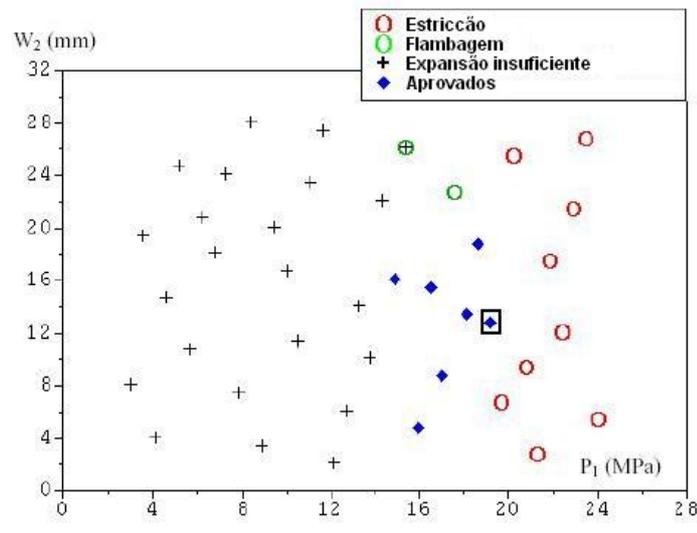


Figura 3.5.3 – Janela de parâmetros admissíveis para o teste de expansão em matriz oval (Prandtl-Reuss)

4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS [5]

O Método dos Elementos Finitos é hoje uma importante ferramenta, algumas vezes indispensável, em projetos e análises de engenharia. Graças aos avanços tecnológicos, os softwares de MEF, atualmente, são utilizados em todas as especialidades de engenharia (estrutural, fluídos, sólidos, transferência de calor, condutividade...).

Conforme previsto no planejamento desse trabalho, um estudo sobre o a teoria do Método de Elementos Finitos (MEF) é realizada, já que esse trabalho utiliza-se dessa metodologia para simular o processo aqui estudado. Este capítulo objetiva-se a apresentar essa Teoria sob o enfoque estrutural não-linear utilizado na simulação do processo de hidroconformação de tubos.

4.1 Desenvolvimento

A essência do Método dos Elementos Finitos consiste basicamente na solução de um conjunto de equações algébricas estabelecidas que regem um determinado fenômeno. A teoria em si é antiga, os primeiros estudos datam da década de 30, mas a aplicação efetiva desse método só foi realmente alcançada com o advento da computação digital, final da década de 60, que possibilitou que os cálculos fossem realizados em tempos mais aceitáveis.

4.2 Problemas físicos e modelagem matemática

Em análises estruturais, o problema físico que tipicamente nos deparamos é uma estrutura, ou um componente estrutural, submetida à certa carga. Sempre que se parte de um problema físico e idealiza-se um modelo matemático que o represente, várias hipóteses são assumidas para que as equações básicas do fenômeno sejam determinadas. O MEF soluciona o modelo matemático através de técnicas de cálculo numérico, sendo que é importante que, um critério de convergência seja bem determinado, para validar a solução obtida. Caso o critério não seja alcançado deve-se alterar o modelo, refinando os parâmetros de entrada, e realizar a solução novamente. A figura 4.2.1 representa o processo de análise de uma solução por MEF.

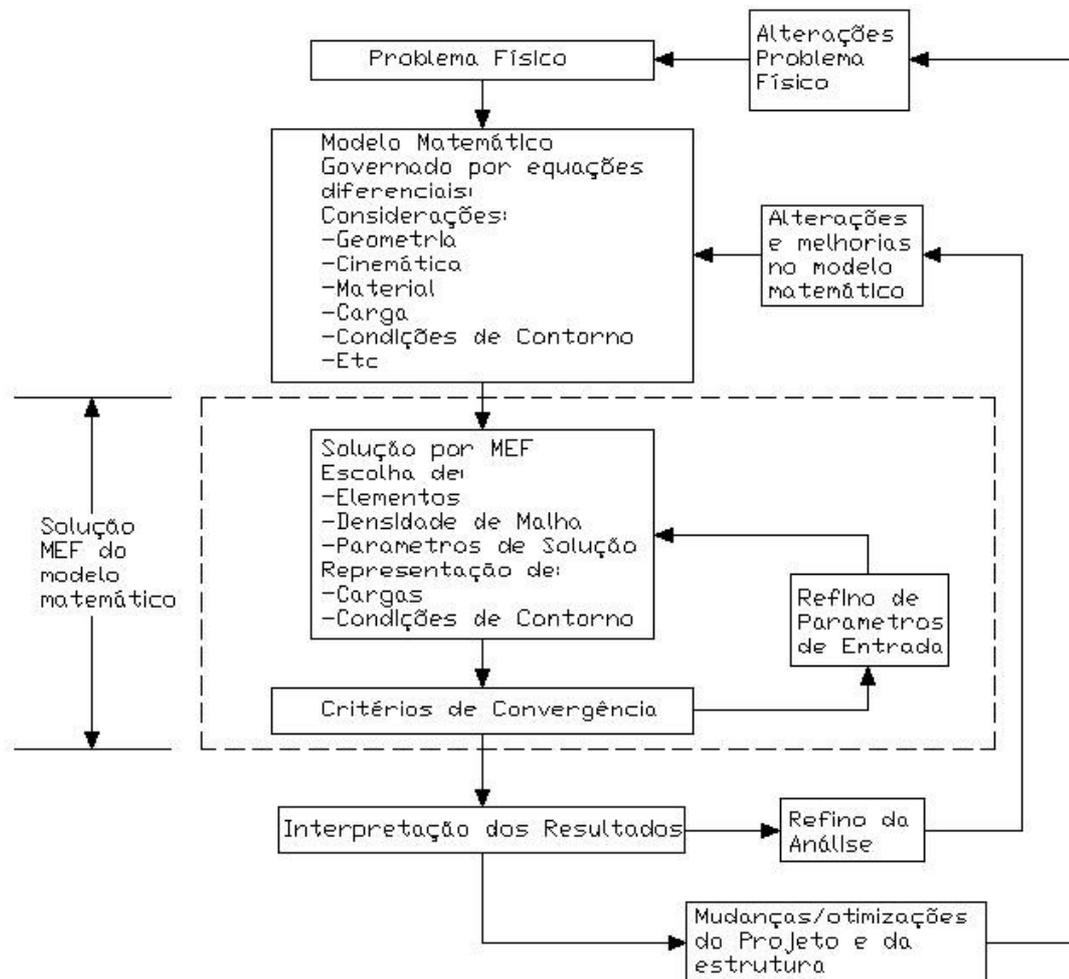


Figura 4.2.1 – Fluxograma de análise por MEF (tradução livre de Bathe [5])

Conforme representado no fluxograma, uma análise por MEF pode ser utilizada para alterações e otimizações de projetos e estruturas, sendo que a escolha do modelo matemático a ser utilizado é fundamental para garantir o sucesso da simulação. Cabe ao engenheiro responsável escolher o modelo mais adequado, considerando dois aspectos: eficiência e confiabilidade do modelo.

É importante frisar que em uma análise por MEF é possível obtermos uma idéia do comportamento físico, porém essa previsão nunca é exata, já que por mais refinado e preciso seja o modelo matemático, ele nunca representará fielmente todos os fenômenos da natureza.

4.3 Conceitos básicos

Para a compreensão da teoria do MEF é necessário conhecimento básico sobre álgebra vetorial, mecânica dos sólidos e modelagem de sistemas discretos. O escopo

desse trabalho não prevê o detalhamento de cada um desses pontos, porém é importante justificar a razão pela qual são importantes.

A utilização de vetores, matrizes e tensores, estudados na álgebra vetorial, é de grande importância nas análises de engenharia principalmente para garantir que os resultados sejam expressos de forma simples, compacta e elegante. Como será visto adiante, a formulação do MEF é toda feita em forma matricial, portanto é importante saber operar com matrizes e vetores para melhor compreender o MEF.

Este trabalho, especificamente, estuda uma análise numérica estrutural e portanto é fundamental compreender os conceitos de mecânica do sólido e o comportamento do material, pois a partir desses conceitos é que se estabelece o modelo matemático e conseqüentemente a formulação do MEF.

Em engenharia, podem-se classificar os modelos matemáticos em duas categorias: sistemas contínuos, que são solucionados por equações diferenciais que atendam as condições de contorno; e sistemas discretos, que utilizam equações algébricas. A teoria do MEF é baseada na modelagem de sistemas discretos, isso ficará mais claro na formulação dos elementos finitos.

4.4 Formulação dos elementos finitos

Em análises lineares de mecânica do sólido e estrutural, os deslocamentos dos elementos são infinitesimalmente pequenos e o material apresenta linearidade elástica. Nesse caso a equação de equilíbrio do elemento (4.4.1) deriva da análise estática, sendo que o deslocamento \mathbf{U} é uma função linear do vetor de cargas externas aplicadas \mathbf{R} e onde \mathbf{K} é a matriz de rigidez do elemento:

$$\mathbf{KU} = \mathbf{R} \quad (4.4.1)$$

As análises lineares são muito limitadas no que diz respeito a sua aplicação, já que para análises que envolvem grandes deslocamentos, rotações e materiais com curva tensão-deformação não linear, elas não são válidas (como é o caso da simulação apresentada nesse trabalho). Nesses casos é necessário adotar uma abordagem com formulação de elementos para análise não lineares, adotando uma equação dinâmica:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{KU} = \mathbf{R} \quad (4.4.2)$$

Onde \mathbf{M} é a matriz de massa (independe do tempo) que multiplica o vetor de acelerações nodais e \mathbf{C} é a matriz de amortecimento que multiplica o vetor de velocidade

Existem três tipos de formulações utilizadas no MEF, são elas: Lagrangeana, Euleriana, e arbitrariamente Lagrangeana-Euleriana. De acordo com Bortolussi (2001) [2], em processos de estampagem e hidroconformação é utilizado a formulação Lagrangeana, figura 4.4.1, pois as deformações na espessura da chapa são pequenas. Na formulação Lagrangeana, que aqui será demonstrada, a malha move-se junto com a estrutura, sendo que as deformações apresentadas pela estrutura serão representadas na malha.

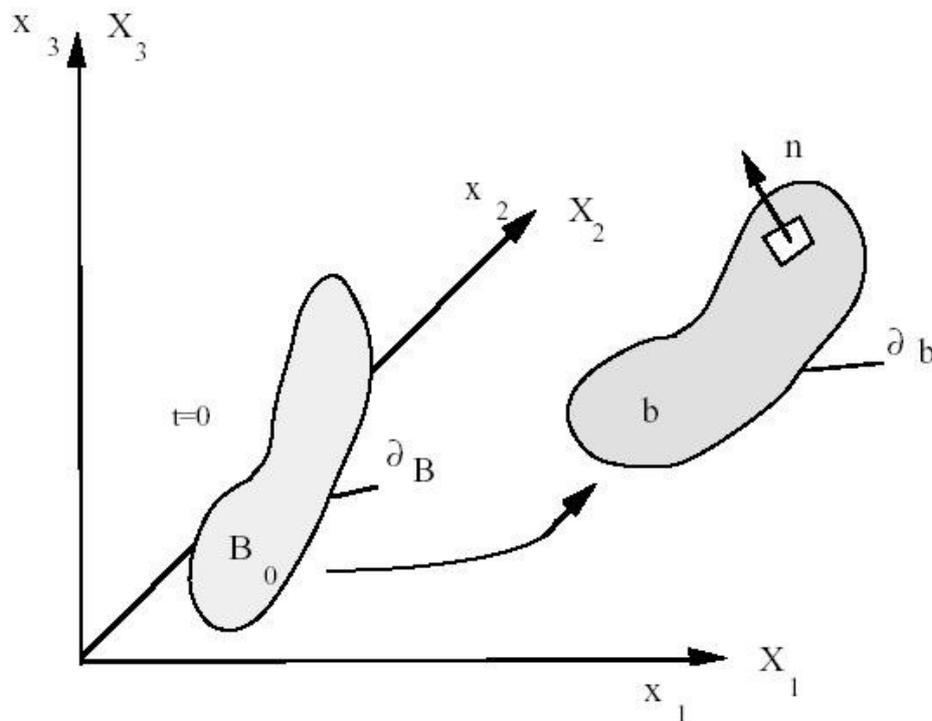


Figura 4.4.1 – Formulação Lagrangeana (Fonte: LS-DYNA Manual [6])

Equações da formulação Lagrangeana: (Bathe 1996 [5])

a) Conservação de Massa

$$m = \int_{V_0} \rho d^0V = \int_{V'} \rho d^tV \Rightarrow \frac{\rho}{\rho_0} = \det({}^t_0x) \quad (4.4.3)$$

b) Equações de Movimento

$$\frac{\partial}{\partial {}^t x_j} ({}^t \tau_{ij}) + \tilde{f}_i^B = 0; \tilde{f}_i^B = \tilde{f}_i^B - {}^t \rho \cdot i_j \quad (4.4.4)$$

c) Princípio dos Deslocamentos Virtuais

$$\int_{V'} {}^t \tau_{ij} \delta e_{ij} d^t V = \int_{V'} {}^t \tilde{f}_i^B \delta u_i d^t V + \int_{V'} {}^t f_i^S \delta u_i d^t S \quad (4.4.5)$$

d) Formulação Lagrangeana total

$$\int_{V'} {}^t S_{ij} \delta {}^t e_{ij} d^t V = {}^t \mathfrak{R} \quad (4.4.6)$$

Criar um modelo de elementos finitos é criar um conjunto de equações como as descritas acima que representam o comportamento de um sistema físico. A questão agora é como solucionar esse sistema de equações.

4.5 Métodos de integração: implícito e explícito. Abrantes e Junior [7]

Em problemas lineares regidos pela equação 4.4.1, os deslocamentos dos nós são calculados por técnicas de decomposição de matriz de rigidez de acordo com Bortolussi (1997) [2].

Problemas não lineares podem utilizar o mesmo princípio (Método Implícito) de forma iterativa, decompondo a matriz \mathbf{K} na equação 4.4.2. Dessa forma calculam-se os deslocamentos nodais e utiliza-se um método numérico para verificar os erros. A cada iteração é necessário reconstruir a matriz de rigidez o que torna essa solução muito demorada.

O método implícito é baseado na aceleração constante média.

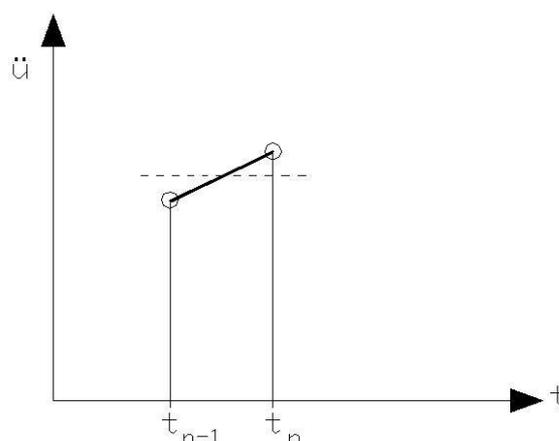


Figura 4.5.1 – Método Implícito

A partir da equação 4.4.2, equações de acelerações e velocidades podem ser escritas conforme o método implícito.

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{4}{\Delta t^2}(u_{n+1} - u_n) - \frac{4}{\Delta t}\dot{u}_n - \ddot{u}_n \quad (4.5.1)$$

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{\Delta t}{2}\ddot{u}_n + \frac{\Delta t}{2}\ddot{u}_{n+1} \quad (4.5.2)$$

A equação, avaliada no tempo t_{n+1} , para encontrar os deslocamentos desconhecidos é dada por:

$$\left(\frac{4}{\Delta t^2}M + \frac{2}{\Delta t}C + K \right) \cdot u_{n+1} = R + M \left(\frac{4}{\Delta t^2}u_n + \frac{4}{\Delta t}\dot{u}_n + \ddot{u}_n \right) + C \left(\frac{2}{\Delta t}u_n + \dot{u}_n \right) \quad (4.5.3)$$

Observe q a matriz \mathbf{K} está colocada ao lado direito da equação o que complica o cálculo, exigindo a sua reconstrução a cada *timestep*.

O método explícito (diferença central) é baseado na mudança linear dos deslocamentos e a solução se dá por integração direta, por métodos não iterativos.

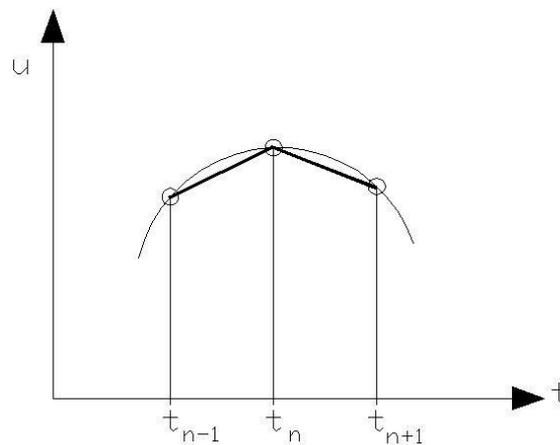


Figura 4.5.2 – Método Explícito

Sobre essa premissa é possível escrever as equações de acelerações e de velocidades:

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{\Delta t^2}(u_{n+1}) - 2u_n + u_{n-1} \quad (4.5.4)$$

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t}(u_{n+1} - u_{n-1}) \quad (4.5.5)$$

Os deslocamentos desconhecidos no tempo t_{n+1} são dados por:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{2}{\Delta t}C \right) \cdot u_{n+1} = R - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2}M \right) \cdot u_n + \left(\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C \right) \cdot u_{n-1} \quad (4.5.6)$$

Como é possível observar a matriz \mathbf{K} de rigidez está localizada ao lado direito, ou seja, não é necessário reconstituir a matriz em cada cálculo de novo deslocamento.

O método explícito será adotado nesse trabalho por ser mais indicado para problemas dinâmicos.

O algoritmo do LS-DYNA utilizará a equação 4.5.6 para determinar os deslocamentos nos instantes seguintes. Vale observar que para calcular o deslocamento em t_{n+1} basta conhecer o estado atual e o estado anterior que no primeiro momento é determinado pelas condições de contorno e estados iniciais.

A partir do cálculo dos deslocamentos fica fácil determinar o vetor velocidade e o vetor aceleração a partir das equações 4.5.4 e 4.5.5.

Esse trabalho não se aprofundará na determinação das matrizes de rigidez e de massa. Mas o princípio segue a teoria de Lagrange e Euler, sendo que existe a matriz de rigidez e de massa Local (para cada elemento) e por operações matriciais, acoplas-se as matrizes a fim de obter a matriz de rigidez Global.

Dessa forma cada nó, ao final do cálculo, terá um vetor aceleração, um vetor velocidade e um vetor deslocamento que estarão representados nas respectivas matrizes Globais, que por sua vez possui a informação de todos os nós.

5 SOFTWARE LS-DYNA [6]

O software LS-DYNA é um código para a solução geral de elementos finitos, destinado a obter respostas dinâmicas de estruturas, acopladas ou não a sistemas fluidos, e envolvendo grandes deformações. O método principal de solução se baseia no método explícito de integração, ideal para problemas dinâmicos.

O Software possui uma grande variedade de formulações de elementos, assim como possibilidade de modelar airbags, sensores, cintos de segurança garantindo o sucesso em aplicações na indústria automobilística.

5.1 Histórico

O LS-DYNA teve seu desenvolvimento baseado no software de domínio público DYNA3D que foi desenvolvido pelo Lawrence Livermore National Laboratory em meados da década de 70 e teve o lançamento de sua primeira versão em 1976. Além de várias limitações com relação aos tipos de elementos existentes, essa versão não possuía controle de *hourglass*, que evita a energia zero (não-físico) nos modos de deformação gerando cálculos inconsistentes fisicamente, apesar de numericamente corretos.

Nos anos que se passaram várias outras implementações foram agregadas ao código: um novo algoritmo de contato de superfícies garantiu um melhor controle de *hourglass*; novos algoritmos de iteração melhoraram a velocidade de cálculo (associado aos avanços tecnológicos); tentativas frustradas de utilização de algoritmos por diferenças finitas foram testados em algumas versões e posteriormente abandonados; novos modelos de materiais foram incluídos; aplicações de cargas com velocidades e acelerações angulares; novos elementos; corpos rígidos; atrito; molas; amortecedores.

A primeira versão do LS-DYNA, desenvolvida por Hallquist, foi apresentada em 1989 pela Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Ao longo dos últimos anos, várias outras aplicações foram incluídas no código de forma a torná-lo mais abrangente e mais efetivo em seus resultados e aplicações.

5.2 Aplicações [8]

O Software LS-DYNA é utilizado em várias aplicações industriais seja em desenvolvimento de projetos, em estruturas ou em análises dinâmicas.

A seguir segue uma listagem com as aplicações comuns do software LS-DYNA:

- f) Indústria automobilística – o software é utilizado em análises de colisões e amassamentos veiculares (crash test e crush test) e também em avaliações de segurança veicular utilizando dummies;
- g) Conformação de chapas metálicas – uma das aplicações mais comuns do software é na conformação de chapas metálicas, graças à ferramenta *adaptive remeshing*;
- h) Metal forming – além de aplicações para chapas, o software permite trabalhos com estampagens, hidroconformação, forjamento, embutimento e processos *multi-stage*;
- i) Indústria militar e defesa – LS-DYNA é capaz de simular explosivos e penetração de projéteis;
- j) Indústria Aeronáutica – simulação de contaminação das lâminas de motores a jato, falhas estruturais e colisões com pássaros;
- k) Outras aplicações – *drop test*, *design* de componentes eletrônicos, modelagem de vidros, plásticos, biomedicina, usinagem, terremotos, equipamentos de sport, engenharia civil, plataformas *offshore*, entre várias outras. LS-DYNA é um dos pacotes de elementos finitos mais completos e flexíveis existentes no mercado.

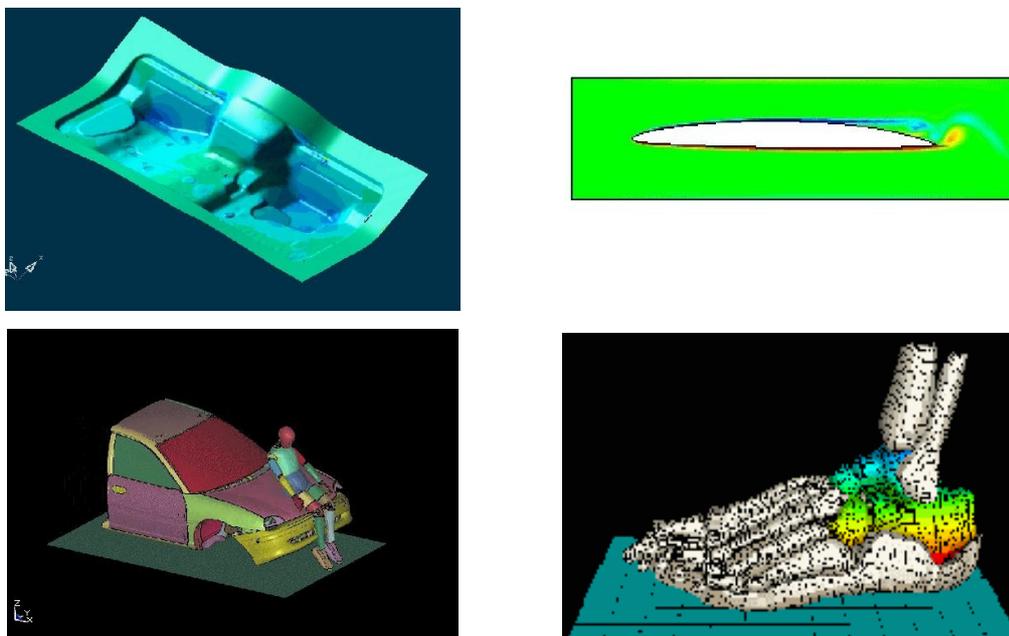


Figura 5.2.1 – Exemplos de aplicação do LS-DYNA: a) conformação de chapas; b) turbulência; d) colisão veicular; e) bioengenharia.

5.3 Estruturação de arquivo de input

O arquivo de entrada deve seguir uma estruturação básica para que o solver entenda a linguagem e possa solucionar o modelo matemático. Alguns softwares de modelagem de malha possuem aplicações que permitem gerar o código de LS-DYNA pronto, porém é fundamental conhecer a estrutura de uma carta para realizar eventuais correções e até mesmo criar o seu modelo de entrada, caso o software que gera a malha não possua compatibilidade com LS-DYNA.

Basicamente cria-se, através de um software de modelagem, a malha (nós, elementos, partes...). Exportando esse modelo para um arquivo padrão ASCII (arquivo texto), altera-se o texto para o formato determinado e incluem-se os comandos de acordo com a simulação a ser feita.

Uma carta segue a seguinte estrutura:

*KEYWORD (campo obrigatório indicando que a carta está estruturada no formato texto)

*TITLE (título)

*CONTROL (comandos de controle)

*DATABASE (comandos para a criação de banco de dados)

*PART (definição das peças)

*MAT (definição dos materiais)

*SECTION (definição dos tipos de elementos)

*NODE (definição dos nós)

*ELEMENT (definição dos elementos)

*END (obrigatório, indicando o fim do código).

Os arquivos de comandos de controle são opcionais e servem para alterar as condições default do programa e ativar algumas soluções específicas como adaptive meshing e mass scaling. Porém o comando *CONTROL_TERMINATION é fortemente recomendado. Outras aplicações definidas pelos comandos de controle são: timestep, elementos, cálculo implícito ou explícito...

Os comandos de banco de dados também são comandos opcionais, porém são necessários para que se obtenha resultados. Através desses comandos é definido qual o tipo de resultado deseja-se gravar e qual a frequência de gravação dos mesmos. É possível registrar os resultados de interações entre superfícies, nós, elementos além

de gravar arquivos com histórico de velocidade, deslocamento, energias entre outras coisas.

O comando *PART define os conjuntos de elementos que formam determinadas peças. Isso pode ser útil na hora de aplicar uma carga, uma velocidade, ou mesmo visualizar os resultados após a simulação.

Os comandos de material permitem associar um modelo de material diferente para cada uma das PARTs dentre os modelos existentes no software (ex.: modelos de materiais isotrópicos, orto-trópicos, viscoelásticos, inelásticos, borrachas, tecidos, polímeros, elasto-plásticos, plásticos não-lineares e etc.)

No item SECTION define-se os tipos de elementos utilizados, as regras de integração, espessuras e outras características dos elementos. Esse item é obrigatório e exige muito conhecimento da teoria de elementos finitos para que seja bem configurado.

Os comandos seguintes *NODE e *ELEMENT são comandos gerados automaticamente pelos softwares de geração de malha. Esses comandos possuem as coordenadas de cada um dos nós e suas identificações, assim como cada elemento é identificado pelo conjunto de nós que o forma.

O anexo A apresenta a carta simulada nesse trabalho e a estrutura utilizada.

Quando se realiza uma simulação é importante prestar atenção nas unidades utilizadas e, portanto seguir um modelo consistente de unidades. A seguir a tabela 5.3.1 apresenta exemplos de conjunto de unidades consistentes:

Tabela 5.3.1 – Exemplos de Conjuntos de unidades Consistentes

| | (a) | (b) | (c) |
|--------------------------------|------------|------------|--------------|
| Unidade de Comprimento | metros | milímetros | milímetros |
| Unidade de tempo | segundos | segundos | milisegundos |
| Unidade de massa | kilogramas | toneladas | kilogramas |
| Unidade de força | Newton | Newton | kiloNewton |
| Modulo de Young do aço | 210E+09 | 210E+03 | 210 |
| Densidade do aço | 7,85E+03 | 7,85E-09 | 7,85E-06 |
| Tensão de escoamento do aço | 200E+06 | 200 | 0,2 |
| Aceleração da gravidade | 9,81 | 9,81E+03 | 9,81E-03 |
| Velocidade equivalente a 30mph | 13.4 | 13.4E+03 | 13.4 |

5.4 Algoritmos de contatos no LS-Dyna [11]

A simulação de um contato entre dois elementos é um dos fenômenos mais difíceis de validar em uma simulação numérica devido ao grande número de não linearidades existentes. Em um caso geral, estudamos o comportamento da interação entre diversos componentes aumentando as não-linearidades do cálculo. Condições inerentes ao contato são também de difícil determinação e portanto torna-se complicado estabelecer modelos apropriados. Ex.: atrito, contato unilateral, contatos térmicos, efeito *stick and slick*... Essas não-linearidades acabam se tornando grandes fontes de erros numéricos.

O software LS-Dyna possui 4 algoritmos de contato. Iremos discutir 2 desses contatos que possuem o mesmo princípio e são os mais utilizados, método da penalização e método *soft constraint*. Existem ainda os métodos específicos *pinball* e o método para contatos cinemáticos que são mais complexos e não serão discutidos aqui.

O método de penalização possui um sistema de busca que realiza a verificação para cada nó escravo se ele penetra geometricamente em um elemento mestre. Caso isso ocorra, a penetração p é calculada.

Em seguida o nó escravo NE é projetado no elemento mestre e o esforço de contato resultante é calculado, conforme mostrado no esquema:

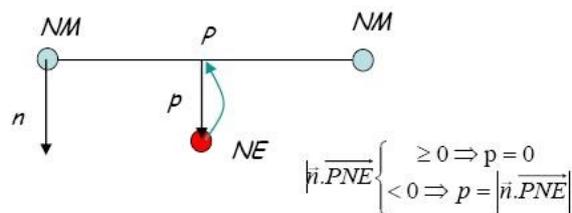


Figura 5.4.1 – Método da penalização.

O cálculo do esforço de contato é realizado através da inclusão de uma mola de rigidez k no sistema que só funciona em tração.

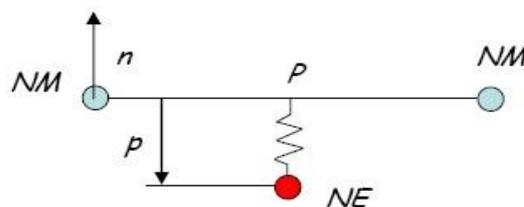


Figura 5.4.2 – Método da penalização.

O esforço de contato pode ser calculado e os esforços são distribuídos entre os nós mestres para equilibrar a estrutura, conforme as expressões:

$$\vec{f}_c = kp \cdot \frac{\overrightarrow{PNE}}{\|\overrightarrow{PNE}\|} > 0$$

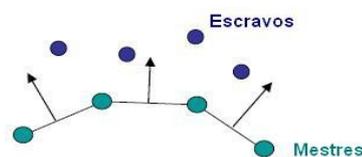
$$\vec{f}_{ci} = -N_i(P) \cdot \vec{f}_c \Rightarrow \sum_{i=1,4} \vec{f}_{ci} = -\vec{f}_c$$

O valor de k é calculado pelo produto entre um fator de penalização (adimensional) e a rigidez da peça mestra ou peça escrava. A diferença entre os métodos de penalização e *soft constraint* está no cálculo de k, sendo que o método de *soft constraint* deve ser utilizado para contato entre peças de rigidez muito diferente, por exemplo, aços-espumas. A princípio o valor de k deve ser bem alto para evitar penetrações e representar a realidade, mas na prática esse valor é limitado pela condição de estabilidade:

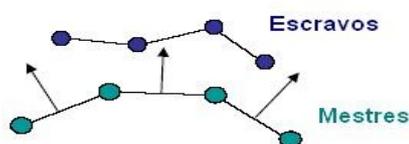
$$\Delta t_c = \sqrt{\frac{4m_e m_m}{k(m_e + m_m)}}$$

Dentre os algoritmos de busca, existem métodos globais e locais. O método global (verifica a penetração de todos nós escravos em todos componentes mestres) é muito custoso e por isso geralmente ele é realizado apenas no início da simulação para identificar os vizinhos iniciais. Após isso, utilizam-se buscas locais levando em conta a topologia conforme o método local escolhido.

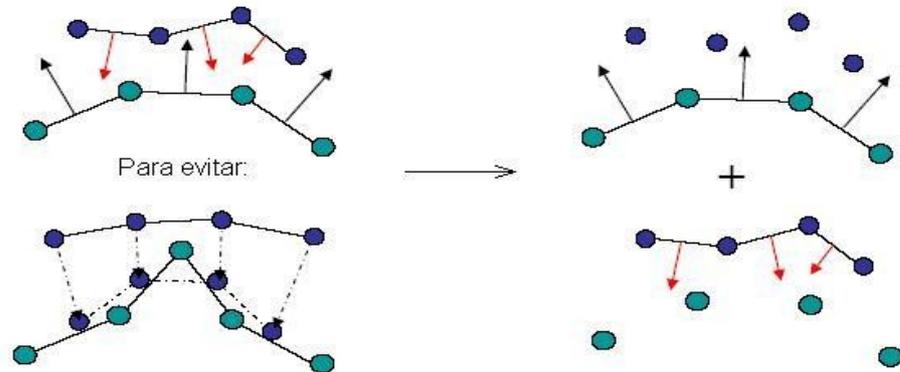
- NODE_TO_SURFACE



- ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE: mesma sub-rotina que node_to_surface mas levando em conta superfícies escravas.



●SURFACE_SURFACE: tratamento simétrico



É importantíssimo entender o funcionamento dos algoritmos de contato para realizar uma regulação correta dos parâmetros e evitar resultados sem significado físico pertinente.

6SIMULAÇÃO

6.1Expansão Hidrostática Livre de Tubo

A primeira parte desse trabalho será focada no exemplo mais simples de hidroconformação de tubos, que é o caso de uma expansão hidrostática livre, sem força axial. A Figura 6.1.1 ilustra esse processo.

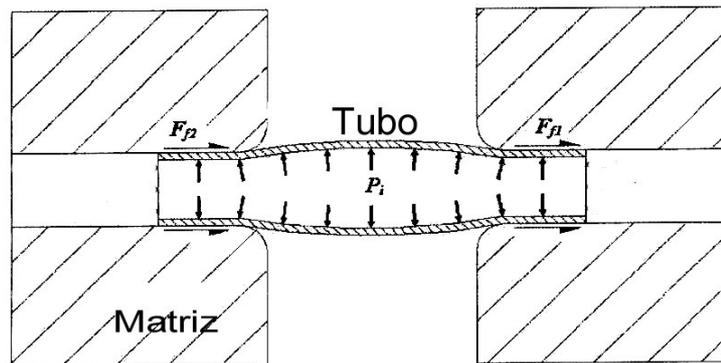


Figura 6.1.1 – Expansão Hidrostática Livre de Tubo

Esse exemplo foi escolhido, pois um trabalho semelhante [1] foi encontrado na literatura e, portanto tentaremos reproduzir o ensaio e repetir os resultados de forma a calibrar o software para realizar estudos de geometrias mais complexas. De acordo com Morphy 2002 [3], a pressão teórica para que se inicie o processo de expansão do tubo pode ser determinado pela expressão que se segue:

$$p_0 = \frac{\sigma_y \cdot t}{r}$$

onde: σ_y é a tensão de escoamento do material do tubo; t é a espessura do tubo e r é o raio médio do tubo. A partir dos dados da tabela 6.1.1.1 e 6.1.3.1, tem-se, para a expansão hidrostática livre simulada neste trabalho: $p_0 = 29,1MPa$. Isso significa que o tubo começará a escoar e conseqüentemente se expandir quando a pressão interna for igual 29,1MPa.

Nesta primeira fase do trabalho, objetiva-se a calibração do software para simulações envolvendo o processo de hidroconformação. Desta forma, foi necessário identificar um exemplo simples e que tivesse resultados práticos presentes na literatura para que fosse possível realizar uma comparação e conseqüentemente considerar o software e os modelos utilizados adequados para essa aplicação. O trabalho de Imaninejad et al (2004) [1] realiza uma simulação da expansão livre de um tubo de alumínio com as

extremidades livres (sem força axial) e foi escolhido como base para este trabalho por apresentar resultados que podem ser repetidos nesta simulação.

O trabalho de Imaninejad et al. (2004) [1] realiza uma simulação com elementos finitos utilizando o software LS-DYNA, porém em seu trabalho os parâmetros utilizados em seu modelo não são apresentados. Desta forma se espera conseguir reproduzir os resultados através de um modelo próprio que será apresentado a seguir.

6.1.1 Modelagem MEF da expansão hidrostática livre de tubos

Para a simulação do processo de expansão hidrostática livre foi utilizado o software para análises não-lineares de elementos finitos LS-DYNA (Hallquist 1998 [6]).

A matriz foi modelada com elementos do tipo Shell rígidos, pois em uma situação real esse é o comportamento mais adequado.

Para o tubo, o modelo de material utilizado foi o modelo 36 (MAT_3_PARAMETER_BARLAT) do banco de dados do LS-DYNA. Essa decisão foi tomada a partir dos resultados de Abrantes [9] que testou vários modelos de materiais da biblioteca do programa e considerou esse mais adequado. O modelo de 3 parâmetros de Barlat requiere a adoção de um valor para o parâmetro de Lankford, que nesse caso é igual a 1, considerando que o material é isotrópico e segue a lei de encruamento exponencial de Holomon, $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$.

A malha foi criada no software Medina v7.0 (cortesia T-Systems IT do Brasil). No total, o modelo contém 258 nós e 205 elementos.

Conforme o trabalho do Imaninejad, utilizou-se coeficiente de atrito, $\mu = 0.05$, considerando que existe lubrificação entre a matriz e o tubo. O modelo criado está representado na figura 6.1.1.1 e a tabela 6.1.1.1 apresenta os dados desse modelo.

MODELO HIDROCONFORMACAO
Time = 0, #nodes=258, #elem=205

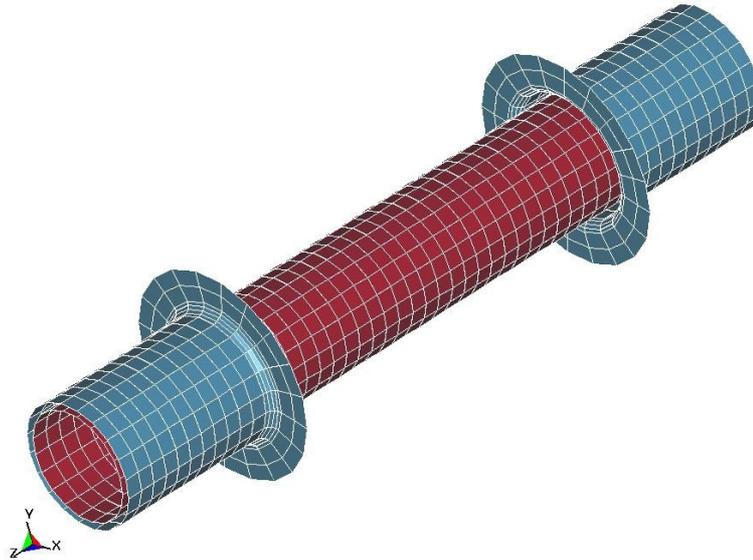


Figura 6.1.1.1 – Modelo MEF.

Tabela 6.1.1.1 – Dados do modelo para o tubo inicial

| Espessura, $t(mm)$ | Raio Médio, $r(mm)$ | Comprimento, $l(mm)$ |
|--------------------|---------------------|----------------------|
| 3,175 | 17,4625 | 240 |

6.1.2 Condições de Contorno para Modelo MEF da expansão hidrostática livre de tubos

Devido às condições de simetria do modelo, foi modelado apenas 1/8 do tubo, considerando 3 planos de simetria, sendo a seguir aplicadas, as condições de contorno necessárias nos nós da parte do tubo modelado de maneira a representar o restante não modelado. As extremidades do tubo estão livres para deslizarem axialmente. A figura 6.1.2.1 mostra o modelo e as respectivas condições de contorno:

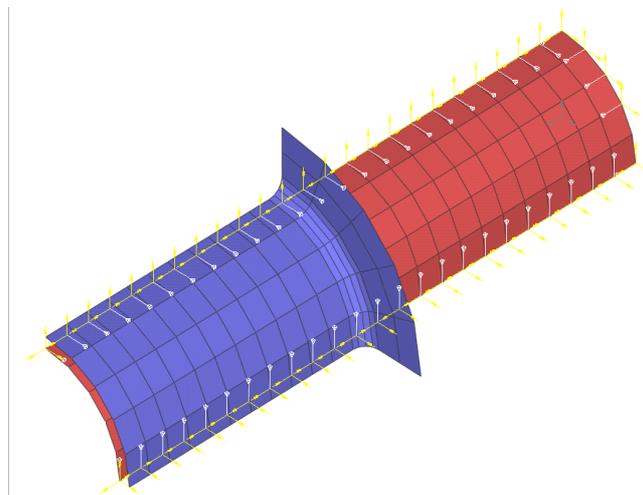


Figura 6.1.2.1 – Condições de Contorno

6.1.3 Propriedades do material e condições de processo de expansão hidrostática livre

O material utilizado na simulação foi o mesmo adotado por Imaninejad et al. (2004) [1], a liga aeronáutica AA6082-T4 com tratamento térmico tem suas propriedades listadas na tabela 6.1.3.1 logo abaixo:

Tabela 6.1.3.1 – Propriedades mecânicas da liga AA6082-T4

| | |
|--|------|
| Densidade, ρ (g/cm) | 2,7 |
| Módulo de Elasticidade, E (GPa) | 71 |
| Coefficiente de Poisson, ν | 0,31 |
| Coef. De Resistência, K (MPa) | 550 |
| Coefficiente de Encruamento, n | 0,25 |
| Tensão de Escoamento, σ (MPa) | 160 |

Segundo Lang et al. (2004) [10], existem dois métodos para a aplicação de pressão: o método linear e o método bilinear, ambos envolvem altas taxas de aplicação considerando-se o efeito físico. Neste trabalho a taxa de aplicação de pressão foi acelerada ao máximo para reduzir-se o tempo de cálculo, porém com um controle da energia interna e cinética para não comprometer o significado físico. A figura 6.1.3.1 apresenta um gráfico que representa a curva de pressurização adotada nesse trabalho.

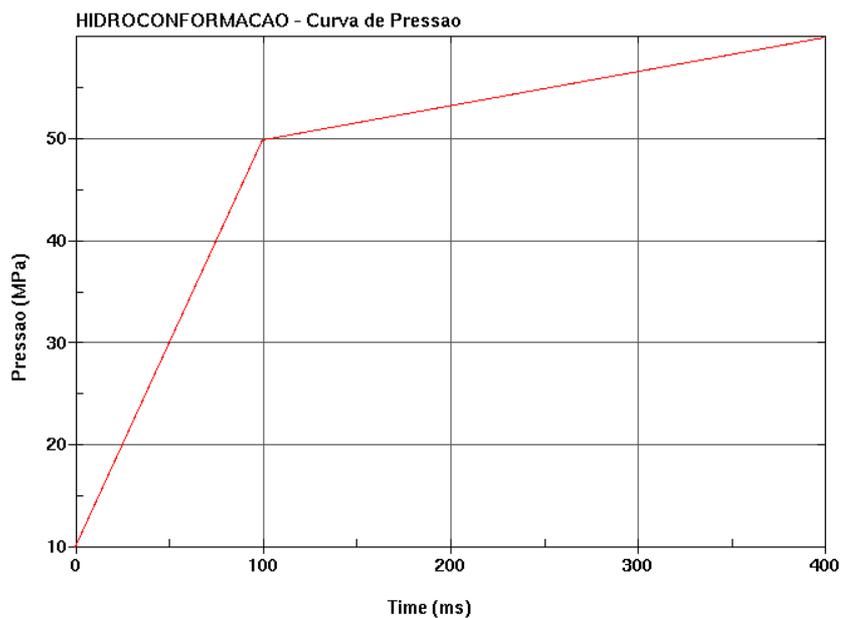


Figura 6.1.3.1 – Curva de Pressão vs. tempo

6.1.4 Resultados da modelagem MEF da expansão hidrostática livre de tubos

O modelo de material utilizado não inclui critério de falha após o trecho de deformação uniforme, representado pela equação $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$ para identificar o início da estricção. Dessa forma foi necessária a determinação de um critério de falha, utilizou-se neste caso a deformação. Considerou-se a falha quando deformação plástica atingiu 10 % e este valor baseou-se na curva FLD apresentada em Imaninejad et al. (2004) [1]. Esse ponto foi considerado como sendo o limite da simulação, pois a partir daí o tubo teria se rompido e o comportamento físico não pode ser verificado na simulação. Seguindo esse critério o rompimento do tubo acontece com $t=110\text{ms}$ que é o tempo no qual o primeiro elemento atinge deformação plástica de 10% e conseqüentemente foi considerado como o instante em que ocorre a falha.

Com relação ao aumento do raio ou altura do bojo, a figura 6.1.4.1 apresenta o gráfico do deslocamento máximo (altura do bulbo) pelo tempo até o instante de rompimento do tubo. A partir deste gráfico pode-se constatar que a altura para o tempo $t=110\text{ ms}$ atinge 2.05 mm, sendo essa a altura máxima atingida pelo bulbo. Ao compararmos com os resultados do trabalho de referencia de Imaninejad, verificamos que o valor está dentro da faixa prevista, sendo sob esse aspecto considerado que o trabalho obteve sucesso.

Utilizando o mesmo critério obteve-se uma pressão para a ruptura (burst pressure) na simulação de 50,3 MPa, que apresenta 3.5 % de erro em relação à pressão obtida por Imaninejad et al. (2004) [1].

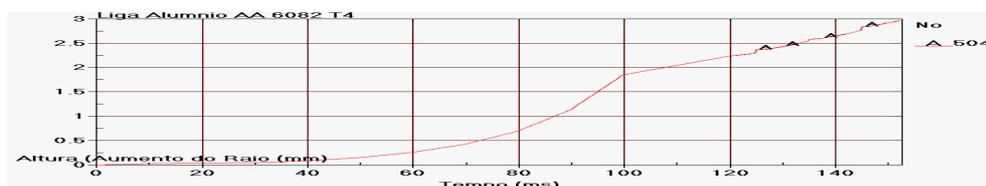


Figura 6.1.4.1 – Altura ou aumento do raio do Tubo vs. Tempo

A tabela 6.1.4.1. apresenta um resumo dos resultados comparativos obtidos na simulação utilizando o trabalho [1] como referência.

Tabela 6.1.4.1 - Resultados comparativos da modelagem

| | Este trabalho | Referência | Erro |
|--------------------------|---------------|--------------|-------|
| Pressão de colapso (MPa) | 50,33 | 47,7 – 49,8* | 0,35% |
| Altura de bulbo (mm) | 2,05 | 1,52 – 2,29* | ~0 |
| Espessura mínima (mm) | 2,97 | - | - |

A figura 6.1.4.2 representa a distribuição de espessuras na peça. Até o instante considerado crítico ocorre uma redução máxima de 5,25% na espessura no tubo.

A figura 6.1.4.3 representa a distribuição de deformações plásticas do tubo no momento considerado como instante da ruptura, ou seja, quando o elemento #31 atingiu o valor limite de deformação plástica (10%).

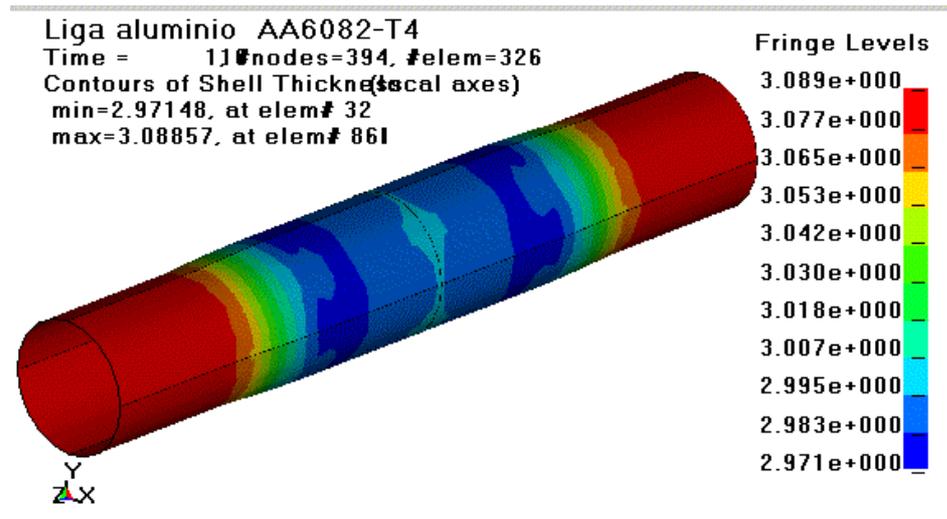


Figura 6.1.4.2 – Distribuição de Espessura

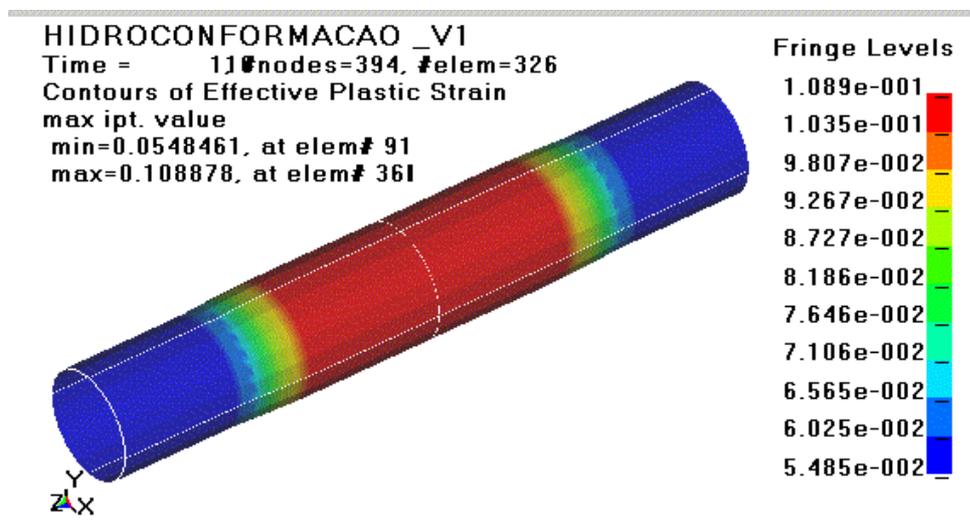


Figura 6.1.4.3 - Deformação plástica do tubo de alumínio AA6082-T4 para $t = 110\text{ms}$; $\varepsilon = 0,109$; $p = 50,3\text{MPa}$.

6.2 Expansão Hidrostática de Tubos em matriz fechada.

O estudo da hidroconformação de tubos em matriz toma como referência a abordagem de LANG 2004 [10]. Na Figura 6.2.1 pode-se ver o esquema do processo.

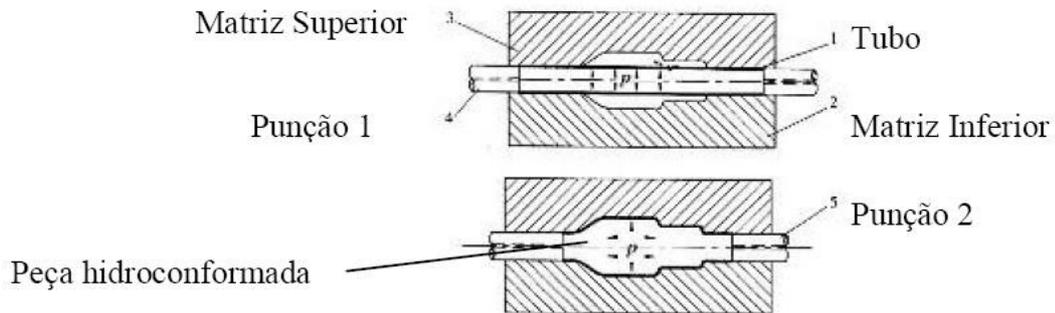


Figura 6.2.1 – Processo de Conformação de Tubos

Inicialmente o tubo 1 é posicionado na cavidade da matriz inferior, a seguir as matrizes são fechadas a fim de evitar que o tubo movimente-se. A seguir o tubo é preenchido com um líquido por orifício existente nos punções e uma pressão inicial é aplicada. No próximo passo os punções 4 e 5 são movimentados de maneira a flambar o tubo. O ato de flambar depende da pressão do fluido interno do tubo, e rugas formar-se-ão, maiores ou menores. Após os punções atingirem o curso programado a pressão do líquido no interior do tubo é aumentada expandindo o tubo, de maneira até que este assuma as formas das matrizes Esta operação é denominada geralmente calibração. Em geral existe uma janela de processo onde se combinando o esforço axial com a pressão interna, obtém-se peças isentas de rugas e fraturas. As rugas criadas durante o processo de flambagem do tubo podem ser benéficas ou ruins No trabalho de LANG 2004 [10], as rugas produzidas no estágio de flambagem são assim classificadas e estão relacionadas ao curso dos punções e a pressão interna inicial. A ruga será benéfica se no estágio de calibração elas forem completamente removidas, já as rugas ruins permanecerão após o estágio de calibração. A ruga será benéfica ou ruim dependendo da pressão interna aplicada ao tubo, à determinação da faixa de pressão que gerará rugas benéficas aliadas ao curso dos punções pode ser determinada através da simulação de elementos finitos e é o que descreveremos a seguir.

6.2.1 Propriedade, geometria e condição de hidroformagem de tubo em matriz fechada.

A simulação deste caso toma como referência peça da Figura 6.2.1.1, estudada anteriormente por LANG 2004 [10]. A hidroformagem torna-se mais indicada devido ao diâmetro do tubo igual a 65 mm, e ao diâmetro da peça acabada de 88 mm,

resultando num alongamento de 33,4%. Tendo-se a uma razão entre o comprimento da zona de expansão da direção axial ($100 + 2 \times 31,6 = 163,2\text{mm}$) e o diâmetro do tubo (65 mm) de 2,5, isto impossibilita a peça de ser feita pelo processo tradicional de estiramento a quente. Na Tabela 6.2.1.1 estão descritos os dados necessários à simulação.

Tabela 6.2.1.1 – Parâmetros e propriedades mecânicas do tubo hidroconformado.

| Material | Liga de alumínio resistente a corrosão LF2M |
|--|---|
| Diâmetro do tubo (<i>mm</i>) | 65 |
| Comprimento do tubo, (<i>mm</i>) | 250 |
| Espessura (<i>mm</i>) | 1,5 |
| Tensão de Escoamento, (<i>GPa</i>) | 0,08 |
| Coefficiente de Resistência, <i>K</i> , <i>GPa</i> | 0,6 |
| Densidade, ρ , <i>g/cm</i> ³ | 2,7 |
| Módulo de Elasticidade, <i>E</i> , <i>GPa</i> | 71 |
| Coefficiente de Poisson, ν | 0,31 |
| Coefficiente de Encruamento, <i>n</i> | 0,25 |
| Coefficiente de Atrito, μ | 0,125 |

O estabelecimento dos parâmetros de pressão interna e pressão axial durante o processo de hidroformagem foram feito com auxílio do trabalho de LANG 2004 [10]. O gráfico da Figura 6.2.1.2 indica que a mínima pressão interna a ser aplicada no tubo para obtenção de uma peça isenta de rugas é 5,5MPa. São tomadas como referencias as pressões de 0 MPa, 3 MPa e 5 MPa, e cursos dos punções acima de 15 mm, para as quais ele relata que todas as peças apresentavam rugas ao final do estágio de calibração. Estes exemplos são tomados para desenvolver-se um modelo MEF via LS-DYNA, a ser calibrado com os resultados relatados para estas três pressões internas.

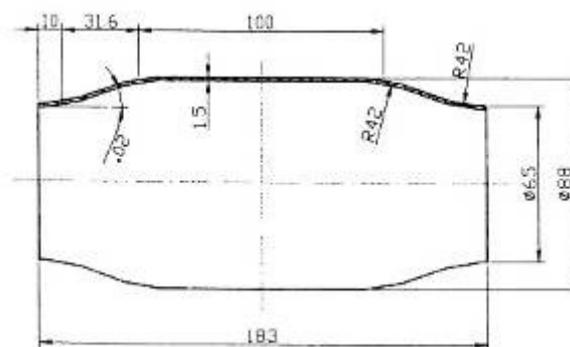


Figura 6.2.1.1 – Peça hidroconformada em matriz [10]

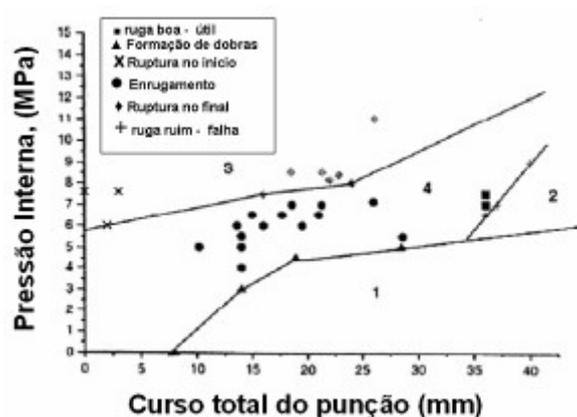


Figura 10. Diagrama de hidroconformação [10]

6.2.2 Modelagem pelo MEF da hidroformagem de tubos em matriz fechada

Inicialmente, foi desenvolvido o modelo 1 similar ao descrito em LANG 2004 [10], como mostrado na Figura 6.2.2.1. Este modelo mostrou-se sensível à construção geométrica, apresentando resultados que diferiram dos resultados apresentados em LANG 2004 [10]. Constatou-se que durante a construção geométrica da matriz havia pequenas diferenças em relação aos planos de simetria da peça, levando o tubo a deformar-se diferentemente em cada lado em relação ao plano YZ mostrado na Figura 6.2.2.1. Isto levou ao aparecimento de rugas ruins mesmo para a pressão de 5,5 MPa, apontado, pelo autor, como sendo a mínima pressão a se obter uma peça isenta de rugas. Assim dois caminhos se apresentavam: reconstruir a geometria da matriz e a malha de maneira a eliminar a diferença entre os lados da matriz em relação ao plano YZ ou desenvolver malha de apenas 1/8 do modelo, acrescentando as condições de simetria suficientes para representar o restante do modelo. A última abordagem foi à escolhida, pois apresentava a vantagem de reduzir o tempo de cálculo significativamente e tal procedimento está sendo considerado para futuros desenvolvimentos de peças que apresentem simetria em relação a um dos planos dos eixos de coordenada. O modelo 2 está mostrado na Figura 6.2.2.1.

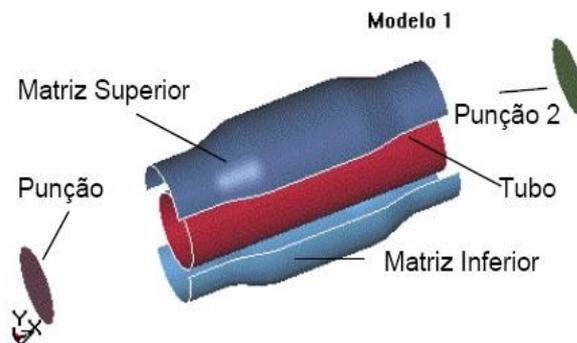


Figura 6.2.2.1 – Modelo 1 em Elementos Finitos para Conformação de Tubo em Matriz.

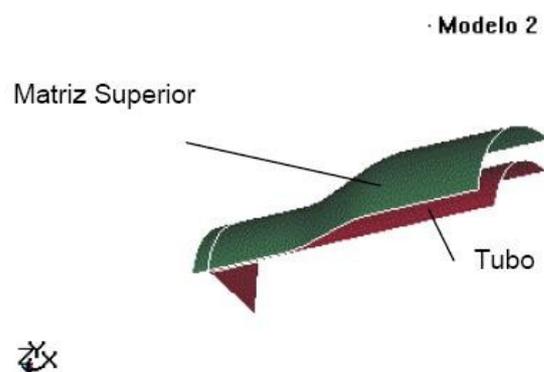


Figura 6.2.2.2 – Modelo 2 em Elementos Finitos para Conformação de Tubo em Matriz

6.2.3 Resultados da simulação MEF para hidroformagem de tubos em matriz fechada

Na Figura 6.2.3.1 estão mostrados os resultados para as pressões de 0,0, 3,0 e 5,5 MPa, todas para um curso de 15 mm do punção. Analisando os resultados em relação ao gráfico da janela de processo relatada por LANG 2004 [10], os resultados da simulação concordam com os resultados obtidos por este autor e comprovam a qualidade do modelo desenvolvido.

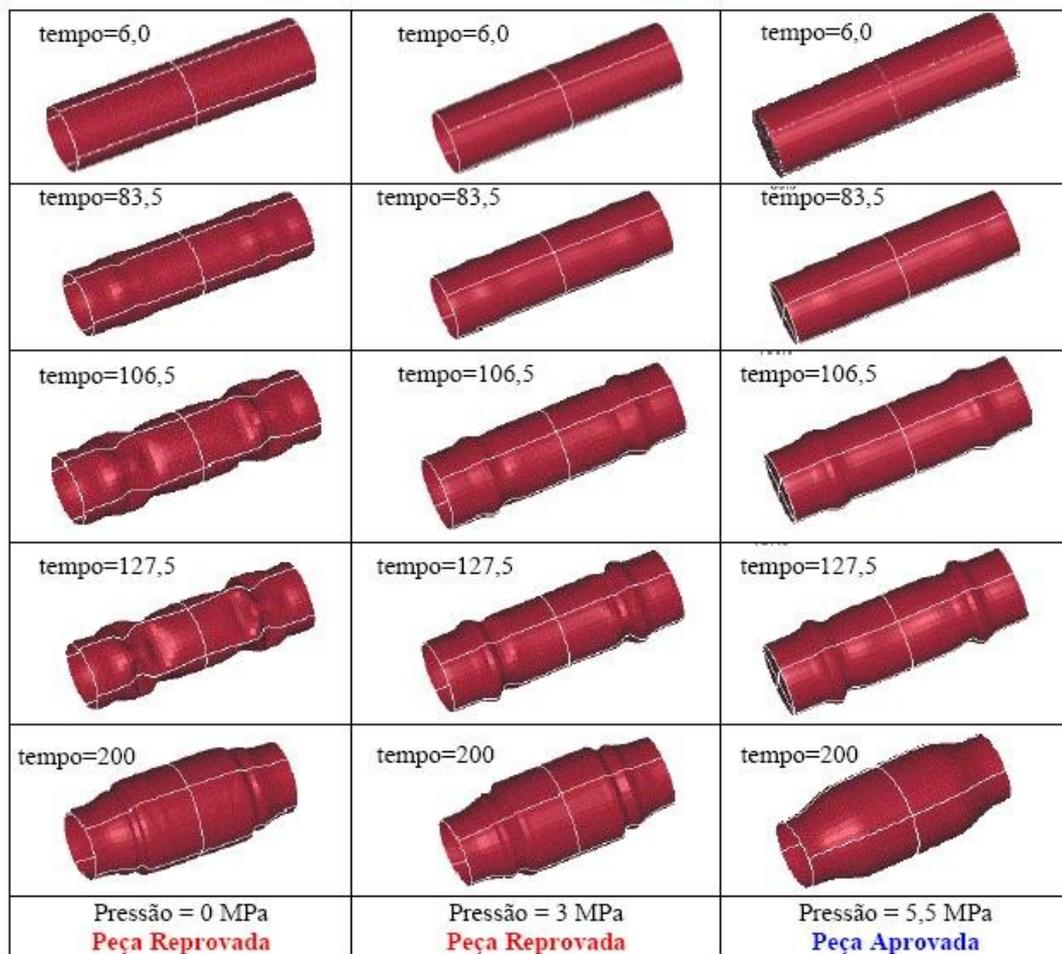


Figura 6.2.3.1 – Evolução da simulação da hidroconformação de tubo em matriz
(tempo em ms)

7CONCLUSÕES

Este relatório de Trabalho de Conclusão de Curso traz os resultados de duas simulações utilizando o software LS-DYNA para modelar via Método de Elementos Finitos a expansão hidrostática livre de um tubo de alumínio e a expansão hidrostática em matriz fechada, sendo que os resultados aqui apresentadas foram considerados satisfatórios por estarem em concordância com resultados encontrados na literatura.

Para que fosse possível a realização desse estudo foi realizada uma revisão bibliográfica que cobriu os tópicos fundamentais como: o processo de hidroconformação; teoria de elementos finitos e formulações; e um estudo teórico sobre o software utilizado. Além dos conhecimentos adquiridos sobre o assunto essas pesquisas foram extremamente válidas sob o aspecto científico, pois vários trabalhos técnicos foram acompanhados servindo como guias para o trabalho aqui apresentado. Dentre os resultados obtidos, pudemos identificar a pressão inicial mínima para a realização da hidroformagem a fim de evitar defeitos de enrugamento. A formação de rugas mesmo que benéficas leva ao dobramento e desdobramento de regiões do tubo, causando distorções na peça após remoção da mesma da matriz.

O sucesso dessa primeira etapa de calibração do modelo pelo software LS-DYNA, permite iniciar, a etapa seguinte do estudo deste grupo de pesquisa, que prevê estudar o processo de hidroconformação em geometrias mais complexas com a inclusão de novos algoritmos na simulação e com novos modelos de materiais. Dessa forma será possível avaliar melhor os fenômenos que ocorrem no processo de conformação hidrostática.

Futuros trabalhos poderão aprofundar o estudo do fenômeno do retorno elástico na conformação hidrostática e estudar a possibilidade de se eliminar o retorno elástico, aplicando e controlando-se simultaneamente a pressão e o movimento dos punções, de maneira a evitar a formação de rugas, e buscando eliminar o retorno elástico proveniente das mesmas.

ANEXO A – “CARTA” LS-DYNA

```

*KEYWORD
*TITLE
Hydroconformacao_v1
*CONTROL_ACCURACY
$#  osu  inn  pidosu
    1    2
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
$#  q1  q2  type
    1.500000  0.060000    1
*CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION
$#  nrcyck  drtol  drfctr  drterm  tssfdr  irelal  edttl  idrflg
    250  0.001000  0.995000    0.0    0.0    0    0.0
*CONTROL_ENERGY
$#  hgen  rwen  slnten  rylene
    2    1    2    1
*CONTROL_HOURLGLASS
$#  ihq  qh
    4  0.100000
*CONTROL_OUTPUT
$#  npopt  neecho  nrefup  iaccop  opifs  iprint  ikedit  iflush
    1    0    0    0    0.0    0    100
$#  iprtf
    0
*CONTROL_PARALLEL
$#  ncpu  numrhs  const  para
    1    0    2
*CONTROL_TERMINATION
$#  endtim  endcyc  dtmin  endeng  endmas
    200.0000    0    0.0    0.0    0.0
*CONTROL_TIMESTEP
$#  dtinit  tssfacc  isdo  tslimit  dt2ms  lctm  erode  ms1st
    0.0  0.900000    0    0.0    0.0
*DATABASE_GLSTAT
5.000000
*DATABASE_MATSUM
5.000000
*DATABASE_RBDOUT
5.000000
*DATABASE_RCFORC
5.000000
*DATABASE_SLEOUT
5.000000
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
1.000000
*DATABASE_BINARY_RUNRSF
5000
*DATABASE_EXTENT_BINARY
    0    0    3    1
    0    1    0    2
*CONTACT_FORMING_NODES_TO_SURFACE_TITLE
$#  cid  title
    1
$#  ssid  msid  sstyp  mstyp  sboxid  mboxid  spr  mpr
    1    2    3    3
$#  fs  fd  dc  vc  vdc  penchk  bt  dt
    0.100000  0.100000    0.0    0.0    0.0    0    0.01.0000e+20

```

```

$# sfs  sfm  sst  mst  sfst  sfmt  fsf  vsf
   1.000000 1.000000  0.0  0.0 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_FORMING_NODES_TO_SURFACE_TITLE
$# cid  title
   2
$# ssid  msid  sstyp  mstyp  sboxid  mboxid  spr  mpr
   1    20    3      3
$# fs    fd    dc    vc    vdc  penchk  bt    dt
   0.100000 0.100000  0.0  0.0  0.0    0    0.01.0000e+20
$# sfs  sfm  sst  mst  sfst  sfmt  fsf  vsf
   1.000000 1.000000  0.0  0.0 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*CONTACT_FORMING_NODES_TO_SURFACE_TITLE
$# cid  title
   4
$# ssid  msid  sstyp  mstyp  sboxid  mboxid  spr  mpr
   1    30    3      3
$# fs    fd    dc    vc    vdc  penchk  bt    dt
   0.100000 0.100000  0.0  0.0  0.0    0    0.01.0000e+20
$# sfs  sfm  sst  mst  sfst  sfmt  fsf  vsf
   1.000000 1.000000  0.0  0.0 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000
*PART
$# title
Blank
$# pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
   1    1    1
*SECTION_SHELL
$# secid  elform  shrf  nip  propt  qr/irid  icomp  setyp
   1    1 1.000000  0    1  0.0    0    1
$# t1    t2    t3    t4  nloc  marea
   1.500000 1.500000 1.500000 1.500000  0  0.0
*MAT_3_PARAMETER_BARLAT
#  mid  ro  e  pr  k  n  src  srp
   12.7000e-06 71.00000 0.310000 0.550000 0.250000  0.0  0.0
#  sigy  vp
   0.0  0.0
*PART
$# title
puncao 1
$# pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
   2    2    2
*SECTION_SHELL
$# secid  elform  shrf  nip  propt  qr/irid  icomp  setyp
   2    2 1.000000  0    0  0.0
$# t1    t2    t3    t4  nloc  marea
   1.000000 1.000000 1.000000 1.000000  0  0.0
*MAT_RIGID
$# mid  ro  e  pr  n  couple  m  alias
   27.8300e-06 207.0000 0.280000  0.0  0.0  0.0
$# cmo  con1  con2
   1.000000  5  7
$#lco or a1  a2  a3  v1  v2  v3
   0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
*PART
$# title
matriz 1
$# pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
   3    3    3
*SECTION_SHELL

```

```

$# secid elform shrf nip propt qr/irid  icomp  setyp
   3    2 1.000000   0   0   0.0
$#  t1    t2    t3    t4   nloc  marea
 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000   0   0.0
*MAT_RIGID
$# mid    ro    e    pr    n  couple    m  alias
 37.8300e-06 207.0000 0.280000   0.0   0.0  0.0
$# cmo    con1   con2
 1.000000   7    7
$#ico or a1  a2    a3    v1    v2    v3
   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
*PART
$# title
puncao 2
$# pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
   20   20    2
*SECTION_SHELL
$# secid elform shrf nip propt qr/irid  icomp  setyp
   20    2 1.000000   0   0   0.0
$#  t1    t2    t3    t4   nloc  marea
 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000   0   0.0
*PART
$# title
matriz 2
$# pid  secid  mid  eosid  hgid  grav  adpopt  tmid
   30   30    3
*SECTION_SHELL
$# secid elform shrf nip propt qr/irid  icomp  setyp
   30    2 1.000000   0   0   0.0
$#  t1    t2    t3    t4   nloc  marea
 1.000000 1.000000 1.000000 1.000000   0   0.0
*DEFINE_COORDINATE_SYSTEM
   1   0.0  0.0  0.0 1.000000   0.0  0.0
   0.0 1.000000  0.0
*DEFINE_CURVE
   1   0  0.0  0.0  0.0  0.0
     0.0  0.00500000
 150.0000000  0.00500000
 150.0099945  0.03000000
 200.0000000  0.03000000
*DEFINE_CURVE
   2   0  0.0  0.0  0.0  0.0
     0.0  0.00000000
 150.0000000  0.20000000
 150.0099945   0.0
 200.0000000  0.0
*SET_PART_LIST
   2   0.0  0.0  0.0  0.0
   2
*SET_PART_LIST
   20  0.0  0.0  0.0  0.0
   20
*LOAD_SHELL_SET
   1   1 1.000000   0.0
*INCLUDE
m10a.dyn //malha em elementos finitos - *NODES e *ELEMENTS //
*END

```

8REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] IMANINEJAD, M. SUBHASH, G. LOUKUS, A. *Experimental and Numerical investigation of free-bulge formation during hydroforming of aluminum extrusions*. Journal of Materials Processing Technology 147 (2004). 247-254.
- [02] BORTOLUSSI, R. *Análise Numérica e Experimental da Hidroconformação de Produtos Tubulares*. Tese de Doutorado, Unicamp. 2001
- [03] MORPHY, G. *The hydroforming design flexibility*. The Tube and Pipe Journal, May 16, 2002. www.thefabricator.com/xp/Fabricator/Articles/Experts/...
- [04] RACHIK. *Optimisation du procede et construction d'une fenetre de faisabilité*.
- [05] BATHE, K.J. *Finite Element Procedures*. Prentice Hall. New Jersey. 1996.
- [06] HALLQUIST, J. O. *LS-DYNA Theoretical Manual*. Livermore Software Technology Corporation. EUA. 1998.
- [07] ABRANTES, J.P. JUNIOR, I. C. *Análise não linear de estruturas em três dimensões com o LS-DYNA*. Notas de Curso. T-Systems IT do Brasil Ltda. 2002.
- [08] Livermore Software Technology Corporation Web Site. www.lstc.com.
- [09] ABRANTES, J.P. *Simulação numérica via elementos finitos da conformação de chapas metálicas por pressão hidrostática (bulge test)*. Tese de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2003. São Paulo.
- [10] LANG, L.H. DANCKERT, J. NIELSEN K.B. WANG, Z.R. WANG, X.S. YUAN, S. *Experimental and numerical investigation into useful wrinkling during aluminum alloy internal high-pressure forming*. Proc. Instn. Mech. Engrs., Part B: J. Engineering Manufacture, 2004, 218, 43-49.
- [11] THIBAUD, S. *Introduction à la simulation de phénomènes non lineaires avec LS-Dyna*. LMARC FEMTO-ST. France. 2006.