

DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS DE CONFORMAÇÃO HIDROSTÁTICA - HIDROCONFORMAÇÃO

*Renato Luiz Portela Cerveira¹
Gilmar Ferreira Batalha²*

Resumo

O projeto de iniciação científica em questão consistiu no desenvolvimento de estudo do processo de conformação hidrostática – hidroconformação.[1-8]. Para a simulação do processo foi desenvolvida uma matriz de aço com espaço para que um tubo fosse conformado. Foi utilizado como matéria, primeiramente, tubos de parede fina de alumínio AA 3033-H19 como os usados em latas de refrigerante, evitando assim a necessidade de pressões muito elevadas que necessitam de melhor aparelhagem e vedação mais segura. Dessa forma foi possível fazer um teste de adequação do ferramental construído. O tubo foi preso nas suas extremidades por duas tampas que vedavam a matriz. Essas tampas por sua vez possuíam um furo cada onde foi injetado óleo a temperatura ambiente.

Palavras-chave: conformação hidrostática; alta pressão; conformação de metais; produção leve.

Abstract

The research project consisted in the development and in the study of the process of hydroforming. For the simulation of the process was developed a steel matrix with enough space for the forming of a tube. It were used aluminium tubes with a thin wall, type AA 3033-H19, the same as the ones used in beverage cans, to avoid the necessity of high pressures that need a better seal. This way it was possible to test the tooling that was built. The tube was fixed in its extremity by two lids in order to seal the matrix. These two lids had a small hole each where the oil was injected (ambient temperature).

Key words: hydroforming; high pressure; metal forming; light production.

1. Introdução

Até os dias de hoje, os principais pontos fracos do processo devem-se em sua maioria ao fato de não se conhecer exatamente o comportamento do material durante a conformação, e também à falta de estudos mais aprofundados sobre o comportamento do atrito nas regiões onde está ocorrendo a conformação, principalmente na zona de transição, onde o tubo começa a tomar a forma desejada [2,6,7,8], caracterizada por um comportamento não uniforme. Especialmente importante neste caso é a determinação de um coeficiente de atrito adequado entre a peça e o ferramental, um parâmetro

¹ Bolsista Fapesp, Processo 01/10909-9; período de bolsa: 01/2002 a 12/2002.

² Professor do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da EPUSP.

imprescindível na otimização do processo. Neste sentido, deseja-se construir um banco de dados confiável com parâmetros adequados a serem utilizados para cada aplicação do processo, como por exemplo: [3,4,5] tipo de lubrificante, pressão interna ideal, rugosidade superficial do material, velocidade de deslocamento mediante experimentos e simulação.

Com uma simulação do processo mais próxima da realidade será também possível evitar erros no projeto e na fabricação da matriz utilizada no processo [3], reduzindo assim os custos sensivelmente e tornando-o ainda mais atrativo para a indústria [3].

Nos últimos anos foram feitos esforços massivos por parte dos fabricantes de todas as categorias de peças automotivas, com o intuito de reduzir o peso das mesmas. A demanda crescente, tanto política como pública, por automóveis com consumo mais baixo, fez com que aspectos do meio ambiente, como o efeito estufa e a poluição do ar, assim como a limitação dos recursos combustíveis, desempenhassem um papel de grande importância na linha de produção. Com o custo crescente dos combustíveis, ganha importância para os compradores de automóveis um dispêndio maior em novos combustíveis e em novos processos, uma vez que eles podem ser pelo menos em parte amortizados através de um consumo mais baixo e através da maior aceitação ecológica. O caminho para as peças mais leves e com isso para veículos econômicos estava traçado.

Diretamente como um processo ideal para produção de peças mais leves pode valer o processo de conformação hidrostática (hydroforming). Através desse processo podem-se fabricar peças ocas com paredes extremamente finas com alta dureza e resistência e com geometrias complexas, que em outros processos de conformação não poderiam ser produzidas como uma única peça, reduzindo assim cordões de solda, parafusos e rebites. A simulação numérica de processos de conformação com base no método de elementos finitos (MEF) possibilita que se faça análises da possibilidade de se fabricar ou não uma peça complexa através da conformação hidrostática e determinar alguns parâmetros importantes para a produção em tempo reduzido. Zonas problemáticas podem assim ser evitadas já na construção das ferramentas, evitando assim o dispêndio de enormes quantias em um projeto defeituoso. Análises de variáveis, como, por exemplo, a utilização de um novo lubrificante, pode ser feita através de alguns cálculos.

Conformação hidrostática na fabricação de peças automotivas

Para classificar as peças produzidas com a ajuda da conformação hidrostática, deve-se conhecer um pouco sobre os campos de aplicação de peças com peso reduzido na indústria automobilística.

O grande propósito da fabricação de peças com peso reduzido consiste em fabricar peças com o mínimo peso que permitam, porém o máximo aproveitamento da ferramenta. A exigência admissível deve ser alcançada em todas as seções da peça. “Coloque material apenas onde houver uma real necessidade” pode valer como lema da fabricação de peças leves.

A fabricação de peças leves é em conceito, uso de material, produção e testes, na maioria das vezes dispendiosa e, de forma geral, nem sempre está ligada a uma queda nos custos em relação aos processos tradicionais. Por isso as vantagens resultantes do processo

devem superar claramente as desvantagens, e com isso, justificar a fabricação de peças leves através da relação custo – benefício. As dúvidas em relação à produção de peças leves foram primeiramente encaradas e trabalhadas pela indústria aeronáutica, para a qual os custos de desenvolvimento e produção não estão sempre em primeiro plano. Na área de tecnologia de trânsito ficam claras várias vantagens econômicas, pois uma redução no peso resulta, por exemplo, em:

- Um aumento da carga útil que pode ser transportada e/ou um aumento da velocidade.
- Um veículo leve possui uma aceleração inercial mais baixa e uma resistência ao rolamento menor.
- O gasto de energia é, portanto menor.

O esforço de se conseguir, através da produção de peças leves, minimizar o peso próprio de uma peça, sem afetar sua função, segurança e seu tempo de vida útil, é atualmente alcançado através de:

- Uso de modos alternativos de fabricação modernos.
- Uso de materiais mais leves e mais resistentes.
- Análises dos esforços e dos carregamentos.

Para essas análises vêm surgindo ultimamente, graças a processadores de melhor desempenho, processos de resolução como o método de elementos finitos. Com a ajuda desses métodos, pode-se alcançar uma grande otimização de processos através da análise de esforços e do comportamento da conformação e também lidar questões como resistência à fadiga e fenômenos de formação de trincas. Por esses motivos o método dos elementos finitos foi também colocado à disposição para simulações de conformação, onde se torna ferramenta imprescindível para a produção de peças complicadas através do processo de conformação hidrostática.

O campo dos materiais utilizados para a fabricação de peças leves é muito abrangente. Além dos tradicionais e resistentes aços e ligas de alumínio, vêm ganhando também terreno as ligas de magnésio e titânio (mais caras, porém com propriedades interessantes). Com os compostos de materiais hoje existentes, estão à disposição materiais de alto desempenho, rígidos e leves.

Produção “leve” na indústria automobilística

Conforme mencionado anteriormente, a redução no peso dos veículos resulta em um consumo reduzido de combustível, sendo assim mais econômico e ecologicamente mais correto. Com aproximadamente 25 a 30% do peso total, a carroceria bruta é o componente mais pesado de um veículo médio. É, portanto, de enorme importância, utilizar peças mais leves na produção desse tipo de componente.

A exigência por automóveis leves e também seguros e com baixo consumo, deixa claro que, a o problema do peso não pode ser lidado separadamente de outros pontos importantes, sobretudo pois algumas dessas restrições estão interligadas. Quem iria, por exemplo, comprar um carro que, apesar de ter um baixo consumo devido ao seu baixo peso, não oferecesse as mínimas condições de segurança em uma colisão?

Por essa razão deve-se recorrer fator de qualidade de peças leves, que serve para medir a qualidade de uma carroceria:

$$\text{Fator de qualidade} = \frac{M_{RK}}{C_T \cdot A}$$

Onde M_{RK} é a massa da carroceria bruta, C_T a resistência à torção e A a área de insurreição (distância entre eixos X distância entre rodas). Assim é possível entender o porque de em alguns casos o peso da carroceria ter aumentado de geração em geração, sendo que o veículo em contrapartida vem ficando maior, mais confortável, seguro e muito mais rígido, que vêm fazendo com que o fator de qualidade melhore continuamente dos anos 70 pra cá.

Como objetivo para veículos futuros aparece a seguinte tendência: O fator de qualidade de peças leves, ou seja, o aproveitamento do material usado, deve aumentar, levando em consideração o desejo do cliente por:

- Maior segurança em caso de acidente
- Maior conforto (acústica, dinâmica, espaço, equipamentos...)
- Redução significativa no consumo de combustível

Uma redução no peso também pode ser levada em consideração através da procura dos clientes por modelos pequenos, menos espaçosos e com menor conforto, a antiga lei da oferta e da procura também vale nesse ponto, enquanto que a tarefa dos engenheiros é otimizar o conceito de veículo desejado, de acordo com fatores como, segurança, rigidez, peso, etc.

Da ala dos materiais, são utilizadas para a fabricação de carrocerias, alternativamente às chapas laminadas a frio, que devido à facilidade de serem trabalhadas estão no mercado há mais de 60 anos, ligas de alumínio ou algum outro metal leve devido ao seu baixo peso específico.

Assim consegue-se uma redução de peso de 40% para a carroceria caso seja utilizado alumínio ao invés de aço convencional. Por esse motivo à oferta de chapas planas para carroceria aumentou significativamente. Aços de alta resistência, com boa conformabilidade e à prova de corrosão fornecem a base para o conceito de produção de peças leves a partir do aço. Com esses tipos de chapas finas de aço em conjunto com o uso adequado do material para a otimização durante a fabricação e o trabalho pode resultar em uma economia de 25% do peso caso fosse usado aço convencional, ou seja, um ganho

apenas 15% menor que no caso da utilização de alumínio. Em contrapartida estão os altos custos devidos aos altos preços dos materiais (chapas de alumínio são de quatro a seis vezes mais caras que chapas de aço e estão sujeitas a variações de preço) assim como às técnicas de fabricação. Peças de carroceria de plástico prensadas são 50% mais caras na produção em série, porém apresentam vantagens na produção em pequena escala.

Conceitos de carroceria, métodos de produção e os custos envolvidos no caso de uso do alumínio são apenas limitados pelas produções em larga escala.

O aço é diferenciado pela combinação das capacidades de conformação, e soldadura, bem como pelos altos valores para módulo de elasticidade e limite de escoamento. Através de um tratamento de superfície apropriado também é possível alcançar uma boa resistência à corrosão, o processo de reciclagem é fechado e é praticado há muitos anos.

Para demonstrar como se pode reduzir o peso de um veículo médio com as técnicas atuais e com os processos de conformação disponíveis, existe atualmente o projeto “Ultralight Steel Auto Body” (ULSAB). Um consórcio entre 34 fabricantes de aço de 16 países (entre eles os alemães Krupp Hoesch Stahl, Preussag Stahl, e Thyssen Stahl) encarregou a firma Porsche Engineering Services pela condução do projeto que tinha como objetivo desenvolver uma carroceria bruta (“body-in-white”) de aço que fosse o mais leve possível. A primeira fase do projeto já está terminada e como resultado foi desenvolvida uma carroceria de aço com peso de 205 kg, cerca de 25% mais leve que uma carroceria bruta produzida em série. Apesar da redução na massa, os valores para rigidez à torção estática e rigidez ao dobramento foram similares àqueles encontrados para carrocerias de produção em série. Os valores verificados foram retirados de cálculos de simulação por elementos finitos de uma malha com mais de 37000 elementos. Simulações de batidas detalhadas levam à resultados muito bons. Foram estudados três conceitos:

- “space-frame” de aço
- carroceria principal
- carroceria com o uso de peças hidroconformadas

A combinação dos dois últimos conceitos levou à carroceria otimizada, na qual são utilizadas tanto peças hidroconformadas, como tailored-blank e aços sólidos.

O aço oferece a possibilidade de modificar propriedades específicas através de ligas ou processos de beneficiamento. Nos últimos anos aumentou muito a oferta de aços que combinam alta rigidez com boa conformabilidade. Através do uso de chapas tradicionais embutidas com chapas finas rígidas pode-se alcançar consideráveis reduções no peso. Com isso se diferenciam as diferentes variantes:

- **Aços endurecidos** são caracterizados através de um endurecimento, ou seja, através de um crescimento do limite de escoamento da peça pronta, que só se torna eficaz depois do processo de conformação, em consequência do tratamento térmico que ocorre na secagem em estufa. Um efeito conjunto, portanto bem vindo (a carroceria deve ser aquecida até temperaturas da ordem de 170°C) que permite que

o material, inicialmente mole e com boa conformabilidade, atinja sua rigidez final apenas após o processo de conformação.

- **Aços isotrópicos** demonstram uma conformabilidade semelhante aos aços endurecidos. Eles se diferenciam acima de tudo por comportamento de conformação altamente dependente da direção na qual o material está sendo conformado.

- **Aços de duas fases** possuem um comportamento de endurecimento característico, que se torna evidente devido a um alto valor do expoente n (coeficiente de encruamento para a caracterização da capacidade de estiramento) no início da conformação.

- **Aços com dureza superior à 1000 N/mm²**, que devem ser conformados a quente e alcançam sua rigidez final através de um processo de resfriamento controlado.

Essas peças são fabricadas com chapas de alta rigidez, nas quais a exigência por dureza pode ser alcançada por chapas finas, devido o alto limite de escoamento.

Como a importância da rigidez é muito grande para a carroceria, deseja-se também que essas chapas sejam de alta rigidez. Para tanto, pode-se reforçar essas chapas. Para estruturas reforçadas são suficientes chapas finas de 0,3 a 0,4 mm, motivo pelo qual se usa a expressão técnica de chapas finas.

Em processos como o “Tailored Blanking” ou a “técnica de Patchwork” é utilizado material nas peças embutidas apenas onde se faz necessário.

O processo de “Tailored Blanks” já é empregado com sucesso para produções em série. Por motivos de custo são utilizadas costuras retas e paralelas, apesar de ser tecnicamente possível que se use qualquer processo de costura.

Na técnica de “Patchwork” são soldados e/ou colados nas chapas para embutimento pedaços de chapas com qualquer contorno nos pontos a serem reforçados. A principal vantagem em relação ao “Tailored Blanks” se baseia no fato de que o processo de costura não possui influência considerável no peço das chapas para embutimento.

Peças leves conformadas hidrostaticamente

No processo de conformação hidrostática são em geral utilizadas peças em formatos tubulares ou mesmo estruturas de chapas para embutimento soldadas, essas por sua vez são colocadas em uma ferramenta com o formato desejado (uma matriz) e posteriormente conformadas através da aplicação de pressão interna e ocasionalmente forças mecânicas.

Com esse processo de produção podem-se produzir peças com geometrias extremamente complicadas e com paredes muito finas a partir de materiais metálicos. Podem ser produzidas geometrias que necessitariam de mais peças em outros processos com apenas uma peça. Até mesmo materiais com baixa conformabilidade, como ligas de alumínio, podem ser trabalhados com esse processo.

A aplicação do processo de conformação hidrostática na indústria automobilística inclui:

- Bastidores secundários
- Longarinas
- Guias longitudinais
- Vigas transversais
- Guias transversais
- Vigas de eixo
- Viga de sustentação do quadro de comando
- Travessas
- Colunas
- Árvores motoras
- Tubos de aspiração
- Peças do escapamento
- Pára-choques
- Vigas estruturais
- Barras de proteção para as portas
- Armações do teto
- Vigas de disco
- Pontos de articulação do space-frame
- Tanques
- Eixos de excêntrico

Peças conformadas hidrostáticamente podem também substituir:

- Peças fundidas
- Uso de solda para junção de peças

Nas ligações por solda além dos custos para obtenção de um bom cordão de solda, surgem problemas de atraso, efeitos de entalhe e alterações da estrutura na região de influência do aquecimento. No caso de peças para embutimento soldadas, por exemplo, é aumentada localmente a rigidez a frio devido a esse aquecimento. A peça produzida por conformação hidrostática não demonstra nenhuma alteração de estrutura desse tipo, mas sim uma favorável distribuição de fibras, um contorno interno favorável e uma maior capacidade de carga devido à rigidez a frio.

Na produção de peças para instalações de escapamento o processo de conformação hidrostática já está consolidado. Além de benefícios econômicos, as peças conformadas hidrostáticamente possibilitam também uma redução no peso que resulta em menores tempos de aquecimento para o catalisador, que por sua vez resulta em uma diminuição de gases poluentes. Por causa das altas temperaturas de funcionamento são muitas vezes utilizados aços finos. A produção típica gira ao redor de 20 mil a 300 mil unidades por ano.

Como exemplo de peças produzidas por conformação hidrostática pode também ser citado o eixo traseiro de alumínio de um veículo. O alumínio é utilizado em quase todas as peças do eixo para se alcançar as mesmas restrições com peso reduzido. A travessa traseira é composta por quatro peças hidroconformadas, sendo elas duas travessas transversais e duas longitudinais, resultando assim em uma redução de 30% no peso original. O material utilizado é o AlMg4,5Mn em forma de tubos com costura. O diâmetro dos tubos está entre 82 a 95 mm com uma espessura entre 3,5 a 4,0 mm.

O processo de conformação hidrostática pode integrar mais de um passo no processo de conformação como um todo. Como exemplo de utilização de um elemento de estrutural produzido por conformação hidrostática pode ser citado o quadro da capota de um veículo.

Perfis de carroceria devem em geral possuir uma resistência à torção e ao dobramento alta. As desvantagens de um método de produção com diversas camadas é que ocorre uma redução de tolerância e por outro lado ocorre também uma redução na resistência à torção nas ligações pontuais. Esses problemas podem apenas ser compensados através da utilização de chapas mais espessas.

O eixo de excêntricos é um exemplo de como através de um processo de conformação hidrostática é possível ligar os excêntricos ao eixo através da expansão plástica, atingindo uma economia de aproximadamente 30% no peso. Os excêntricos individuais são nesse caso presos por ajuste forçado pela expansão do tubo. Novas técnicas estudam a viabilidade de se produzir eixos de excêntricos como uma única peça.

As vantagens e desvantagens do processo podem ser assim citadas:

Vantagens:

- Peças com parede fina (alto aproveitamento de material)
- Baixo peso
- Alto aproveitamento de espaço devido à complexidade de formas possíveis
- Elevada vida útil da ferramenta
- Baixa variação dimensional em produção em larga escala
- Diminuição do número de passos necessários para se alcançar o produto final
- Melhoria das propriedades mecânicas do material
- Peças com diferentes espessuras ou materiais podem ser fabricadas em uma única ferramenta
- Diminuição do uso de processos de soldagem
- Ferramenta para prototipagem também pode depois ser utilizada para fabricação em série

Desvantagens:

- Alto custo
- Raios pequenos não são possíveis de serem alcançados
- É necessária uma técnica de controle de alto custo
- Falhas nos flanges
- Aspectos de segurança devido à alta pressão

O processo de conformação hidrostática não é em seus princípios um processo de produção novo. Ele começou, porém a fazer parte da produção industrial apenas nos últimos anos, devido ao desenvolvimento mais apurado do conhecimento técnico, principalmente nas áreas de produção de ferramentas, pressões hidráulicas elevadas e técnicas de segurança.

A conformação hidrostática é, em linhas gerais, a conformação de um corpo até o mesmo alcançar a parede da ferramenta com o formato desejado através da força interna exercida, em geral, por um meio líquido pressurizado. Como exemplo para o processo de conformação hidrostática pode ser descrito o processo utilizado para a obtenção de uma peça em formato 'T' que também vêm sendo estudado pelo grupo de pesquisa.

O tubo é primeiramente colocado em uma das metades da matriz e a mesma é fechada. A geometria da matriz representa o formato desejado da peça a ser produzida. Através de uma força axial provocada por tampas é feita a vedação do tubo. O tubo é agora preenchido com um meio líquido, com especial atenção para que não entre ar no interior do tubo. É então aplicada a pressão necessária para conformar o tubo, até que este atinja o formato desejado. Ao mesmo tempo em que o tubo está se conformando, é aplicada uma força para se controlar melhor a velocidade do processo, evitando o rompimento da zona de expansão. Os parâmetros são calibrados para que a peça atinja exatamente o contorno da matriz com a qualidade desejada. Com isso, e dependendo do material utilizado a pressão interna pode atingir 6000 bar. Por último a matriz é aberta e a peça final é retirada.

O processo de conformação hidrostática é aplicado principalmente em peças tubulares, chapas planas soldadas em formato tubular também podem ser usadas. Tubos de aço, por exemplo, são em geral soldados longitudinalmente, no campo do alumínio são em geral utilizados tubos produzidos por extrusão. Assim como o alumínio pode ser utilizado também cobre, aço estrutural, aço com ligas e latão. Na Figura 1 é feita uma ordenação dos processos de conformação hidrostática de acordo com suas características.

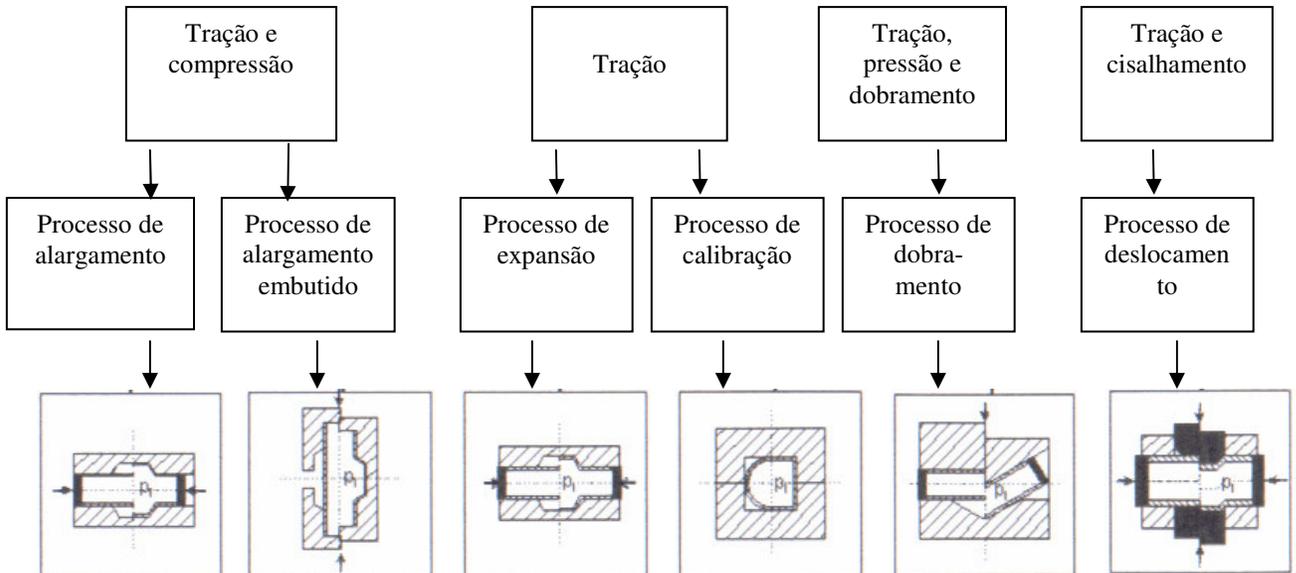


Figura 1. Processos de conformação hidrostática.

Para todos os processos de conformação hidrostática é comum a expansão através da conformação do material com a ação predominante da pressão hidráulica interna.

Uma integração de diferentes processos de conformação hidrostática também é possível. Dessa forma é possível serem produzidas peças com complexidades bem variadas em um único passo.

O fechamento da matriz é garantido normalmente por grandes prensas hidráulicas. O tamanho dessa máquina depende diretamente da força necessária para que haja fechamento da matriz sem vazamento. Industrialmente encontram-se prensas com forças que variam entre 1.500 e 360.000 KN. Outros fatores determinantes são também a espessura da parede, o material, e a geometria desejada. Quanto menores os raios desejados maior será a pressão aplicada internamente.

2. Modelagem Teórica

2.1. Introdução

Quando se pretende estudar processos que envolvam conformação ou deformação de algum material é muito importante que se entenda e se conheça o ponto em que ocorre a passagem de deformação elástica para plástica uma vez que deve ocorrer deformação plástica do material para que este seja conformado, para tanto, os critérios de escoamento são de enorme utilidade [8] [9] [23] [24].

Quando submetido à tensão um corpo começa a se deformar. Enquanto estiver ocorrendo deformação elástica, o corpo sob tensão retorna ao seu estado inicial caso a tensão seja removida. Nessa zona de deformação a tensão e a deformação estão relacionadas por constantes elásticas, usualmente E e ν (Lei de Hooke). Para causar deformação plástica, um nível particular de tensão deve ser alcançado; essa é a chamada tensão de escoamento. Para a maioria dos materiais dúcteis, tanto a extensão da deformação como a mudança na forma do corpo, no estado inicial, podem continuar até um grau elevado antes do rompimento, caso a tensão que causou o escoamento inicial for continuamente aumentada.

2.2. Anisotropia

Antes que sejam apresentados critérios de escoamento é importante que se entenda o que é anisotropia e como ela é importante na conformação de metais.

A anisotropia plástica representa a variação das propriedades mecânicas em função da direção em que as mesmas estão sendo medidas [8] [9]. Nos metais a causa mais importante da anisotropia plástica é a orientação dos grãos, ou seja, a orientação da estrutura cristalográfica. Macroscopicamente a anisotropia possui ligação direta com o processo de fabricação das peças metálicas, especialmente no caso de chapas laminadas, pois é a laminação que alinha os grãos em um determinado sentido, o que gera uma orientação preferencial que irá modificar a capacidade de deformação do material nas diferentes

direções em relação à direção de laminação.

Por esse motivo a anisotropia é de tanta importância para processos de conformação, pois assim ela é responsável pela variação de espessura e pela formação de “orelhas” no caso, por exemplo, da estampagem profunda.

Valores elevados de anisotropia significam menos instabilidade plástica, por esse motivo, valores altos são preferencialmente utilizados para que se possa aumentar a capacidade de deformação na largura com reduções pequenas na espessura. A equação para a determinação da anisotropia será apresentada a seguir bem como algumas de suas funções e importância.

2.3. Equações Constitutivas

Diferentes materiais se comportam diferentemente sob o mesmo carregamento externo. Para descrever o comportamento surge a necessidade de uma conexão entre as deformações e as tensões em um meio. Essas relações são chamadas de equações constitutivas.

O ensaio de tração uniaxial é um dos testes mais simples para se estudar o comportamento dos esforços e tensões no material durante a conformação do material. Um corpo de prova com comprimento L_0 e uma seção transversal A_0 é sujeito a uma força F . Com isso pode-se traçar uma curva de ductilidade, que demonstra a relação entre a tensão verdadeira σ e a deformação em escala natural ou logarítmica ε até o rompimento do material:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{A} \\ \varepsilon &= \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)\end{aligned}\tag{3-1}$$

Com:

F = força tensora

A = área instantânea da seção transversal

L = comprimento instantâneo do corpo de prova

L_0 = comprimento inicial do corpo de prova

Caso retire-se a força e o material retorne ao seu estado inicial, o comportamento é dito elástico ou reversível. Para a maioria dos metais o comportamento elástico é linear. Portanto a relação entre tensão e deformação é:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon\tag{3-2}$$

Sendo E o módulo de Elasticidade ou de Young.

A um certo valor de deformação a tensão de escoamento é atingida. A partir desse ponto o comportamento do material se torna plástico ou irreversível, ou seja o estado inicial não é mais atingido com a retirada da carga; esse é o ponto que interessa para a conformação de materiais, onde é necessária uma deformação permanente. A partir da tensão de escoamento a inclinação da curva muda consideravelmente e começa a formar uma parábola. A retirada do carregamento que age no corpo de prova na zona plástica, resulta em uma deformação plástica permanente ϵ_p . A inclinação da curva durante o alívio de carga é assumido como sendo o mesmo que o da zona elástica, o módulo de Young é assumido como sendo constante. Assim, as deformações plásticas não afetam as propriedades elásticas do material. Essa é a base da teoria da plasticidade. A deformação total é decomposta em uma componente elástica e outra plástica:

$$\epsilon^{tot} = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (3-3)$$

Para a maioria dos materiais de engenharia um aumento de tensão é encontrado para deformação contínua. Quando, após o alívio de carga, o material é novamente submetido ao carregamento a partir de ϵ_p a plasticidade reinicia em um ponto anterior à tensão plástica σ_B . Após alguma deformação a curva se reaproxima da curva que seria encontrada sem que houvesse o alívio de carga.

A restrição do teste de ductilidade é que ele é um teste uniaxial, e estados de tensão multiaxiais não podem ser ilustrados por uma simples curva de tensão-deformação. Uma formulação matemática para o comportamento multiaxial do material é dada abaixo.

Na elasticidade linear é usada a lei de Hooke:

$$\sigma = E \div \epsilon^e \quad (3-4)$$

O tensor de tensão σ e tensor reduzido de deformação elástica ϵ^e estão relacionados pelo tensor de elasticidade de quarta ordem E. Quando os tensores de tensão e de deformação são escritos como vetor e se o tensor de elasticidade é escrito como uma matriz a seguinte expressão para material ortotrópico é encontrada:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{XX} \\ \sigma_{YY} \\ \sigma_{ZZ} \\ \sigma_{XY} \\ \sigma_{YZ} \\ \sigma_{XZ} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 2G+l & l & l & 0 & 0 & 0 \\ l & 2G+l & l & 0 & 0 & 0 \\ l & l & 2G+l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{XX} \\ \varepsilon_{YY} \\ \varepsilon_{ZZ} \\ \varepsilon_{XY} \\ \varepsilon_{YZ} \\ \varepsilon_{XZ} \end{Bmatrix} \quad (3-5)$$

Com

G = módulo de rigidez ou de cisalhamento.

L =: constante de Lamé.

Ambos os parâmetros podem ser expressos pelo módulo de elasticidade E e pelo coeficiente de Poisson ν :

$$G = \frac{E}{2(l + \nu)}$$

$$l = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (3-6)$$

Após carga adicional o comportamento do material se torna plástico. O tensor de deformação total se divide em um componente elástico e outro plástico.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (3-7)$$

A substituição do tensor de deformação elástica ε^e na lei de Hooke, eq. (3-28), e derivando em relação ao tempo chega-se a :

$$\dot{\sigma} = E \dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}^p \quad (3-8)$$

Com o objetivo de distinguir a deformação plástica em um estado de tensão multiaxial é definida uma função de escoamento:

$$\phi = \phi(\sigma, \lambda) \quad (3-9)$$

A função de escoamento depende das tensões e da deformação plástica acumulada. A deformação plástica ocorre quando $\phi = 0$; na região elástica $\phi < 0$. O postulado de Drucker diz que para um elemento de volume material qualquer ciclo completo no espaço da tensão requer uma energia não negativa. O postulado vale para todo incremento de deformação plástica, independente de quão pequeno ele é. O postulado pode ser escrito como:

$$(\sigma - \sigma_0) \dot{\epsilon}^p \geq 0 \quad (3-10)$$

Nessa equação σ_0 é o estado inicial de tensão, σ é um valor arbitrário no espaço de tensão e $\dot{\epsilon}^p$ o incremento de deformação plástica correspondente. O postulado é uma solicitação não física, porém é satisfeito por metais. O postulado expressa duas regras, a primeira regra diz que a função de escoamento deve ser convexa. A segunda diz que o tensor da taxa de deformação plástica é ortogonal à superfície de escoamento. Essa condição de normalidade ou regra de escoamento é escrita:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}^p &= \dot{\lambda} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \\ \dot{\lambda} &\geq 0 \end{aligned} \quad (3-11)$$

O parâmetro $\dot{\lambda}$ é um escalar. A regra de escoamento é válida para deformação plástica e quando não ocorre o alívio de tensão. Quando a deformação é elástica o escalar $\dot{\lambda}$ tende a zero. Resumindo:

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} = 0 &\leftrightarrow (\phi < 0) \vee (\phi = 0 \wedge \dot{\phi} < 0) \\ \dot{\lambda} > 0 &\leftrightarrow (\phi = 0 \wedge \dot{\phi} \geq 0) \end{aligned} \quad (3-12)$$

A equação (3-8) pode agora ser escrita como:

$$\dot{\sigma} = E \div \left(\dot{\epsilon} - \dot{\lambda} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right) \quad (3-13)$$

Para encruamento isotrópico a tensão de escoamento depende somente da tensão e do escalar variável $\dot{\lambda}$ representando a deformação plástica acumulada. Com a condição de que o estado de tensão permanece na superfície de escoamento $\dot{\lambda}$ pode ser determinado:

$$\dot{\phi} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \div \dot{\sigma} + \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} \dot{\lambda} = 0 \quad (3-14)$$

Com a equação (3-13) é encontrado:

$$\dot{\lambda} = \frac{-\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \dot{\epsilon}}{\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} - \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \frac{\partial \phi}{\partial \sigma}} \quad (3-15)$$

Assim, a equação geral constitutiva para material elástico plástico pode ser escrita como:

$$\dot{\sigma} = E : \left(\dot{\epsilon} - \frac{\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \dot{\epsilon}}{\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} - \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \frac{\partial \phi}{\partial \sigma}} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right) \quad (3-16)$$

Onde Y é o tensor de escoamento de quarta ordem que é escrito como:

$$Y = \frac{E : \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E}{\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} - \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \frac{\partial \phi}{\partial \sigma}} \quad (3-17)$$

O escalar h é o coeficiente de encruamento:

$$h = \frac{\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}}{\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} - \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \frac{\partial \phi}{\partial \sigma}} \quad (3-18)$$

Uma equação geral, equação (3-17), dependendo de uma função de escoamento arbitrária é encontrada. Essa descrição vale para pequenas deformações. No caso de grandes deformações, essas deformações são consideradas como pedaços de pequenas deformações. A única coisa a ser feita é a correção da taxa de tensões para rotações. Isso é feito expressando a taxa de deformações Jaumann em termos da taxa de deformação:

$$\sigma^\nabla = \dot{\sigma} - W \cdot \sigma + \sigma \cdot W \quad (3-19)$$

Deve-se agora apenas encontrar uma expressão adequada para a função de escoamento que dependerá do material utilizado.

2.4. Método Analítico para a modelagem da expansão hidráulica

O modelo analítico a seguir foi formulado a teoria da membrana axisimétrica e a teoria da deformação incremental [19]. A equação que dá tensão de escoamento, σ_{eq} , do material correspondente a taxa de deformação $\dot{\epsilon}_{eq}$ é:

$$\sigma_{eq} = K \dot{\epsilon}_{eq}^m \quad (4-1)$$

Onde m é o coeficiente de encruamento e K a constante plástica de resistência do material. A partir do critério de escoamento de Von Mises e do estado plano de tensões tem-se:

$$\sigma_{eq} = \left(\sigma_m^2 - \sigma_m \sigma_c + \sigma_c^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-2)$$

Onde σ_m é a tensão meridional e σ_c a tensão circunferencial. A tensão meridional pode ser obtida da equação do equilíbrio de forças:

$$\sigma_m = \frac{pR}{2t} \quad (4-3)$$

Onde p é a pressão, t a espessura e R o raio de curvatura. As equações de Levy-Mises são dadas como:

$$\frac{d\varepsilon_c}{\sigma'_c} = \frac{d\varepsilon_m}{\sigma'_m} = \frac{3d\varepsilon_{eq}}{2\sigma_{eq}} \quad (4-4)$$

Onde σ'_c , σ'_m são tensões desviatórias e $d\varepsilon_m$, $d\varepsilon_{eq}$ as deformações incrementais nas direções meridional e circunferencial, respectivamente. A equação (4-4) pode ser utilizada para obter a relação entre σ_c e σ_m como segue:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = \lambda = \frac{\left(\frac{1+2d\varepsilon_c}{d\varepsilon_m} \right)}{\left(\frac{2+1d\varepsilon_c}{d\varepsilon_m} \right)} \quad (4-5)$$

A equação (4-5) dá a taxa de tensão caso as deformações nas direções meridionais e circunferencial possam ser obtidas a partir de relações geométricas.

3. Materiais e Métodos

O ferramental construído consiste de três partes: a parte tubular do meio com o espaço suficiente para que ocorra a expansão da peça hidroconformada, e duas espécies de tampas furadas com o diâmetro igual ao diâmetro externo do tubo que será utilizado como corpo de prova. No caso a matéria prima escolhida como corpo de prova foi o alumínio. Como a obtenção de elevadas taxas de pressão é difícil de ser conseguida optou-se primeiramente, em uma fase de ensaios preliminares para a adequação do ferramental e testes de funcionalidade, pelo uso de tubos com parede bem fina (0,2mm – 0,8 mm), que não necessitariam de pressões tão altas para serem conformados. Porém esses tubos de alumínio por possuírem espessura muito reduzida e variações dimensionais de um tubo para outro, apresentaram resultados não muito similares nos ensaios. Foram realizados vários ensaios para se tentar obter um padrão geral, porém o desvio em alguns casos foi significativo, o que fez com que vários ensaios fossem desconsiderados.

Uma vez com todo o ferramental preparado para a realização dos ensaios traçou-se um plano a ser seguido para a verificação da funcionalidade e a posterior obtenção de dados referentes ao processo.

➤ Conexões e preparação

1. Verificar a adequação das conexões usinadas com as conexões da bancada de pressão de óleo.
2. Colocar o tubo dentro da matriz.

3. Posicionar e apertar as tampas de vedação em ambos os lados.
4. Prender as conexões de engate rápido nas tampas.
5. Parafusar os as barras de segurança (não permitem que a tampa saia do ferramental durante o ensaio) do aparato.
6. Engatar as mangueiras de óleo nas conexões.
- Verificação e ajustes iniciais
7. Com pressão bem baixa verificar se as tampas de vedação estão suficientemente apertadas, permitindo uma vedação eficiente.
8. Posicionar o relógio comparador no centro do tubo para medir deformação máxima.
9. Preparar cronômetro.
10. Ensaio (variantes 1 e 2).
11. Aumentar a pressão, anotar a deformação em função da pressão interna e anotar a pressão que provocou a ruptura.
12. Com pressão alta verificar o tempo decorrido até a ruptura.
13. Retirada do corpo de prova da matriz.
14. Abrir válvula para redução da pressão na matriz.
15. Retirar tampas de vedação.
16. Derramar o óleo.
17. Sacar as “tampas” da matriz.
18. Retirar tubo sem danificá-lo.
- Tomada de dados
19. Mapear tubo para verificar altura do abaulamento em diferentes posições (Figura 2).
20. Cortar tubo para medir variações de espessura.

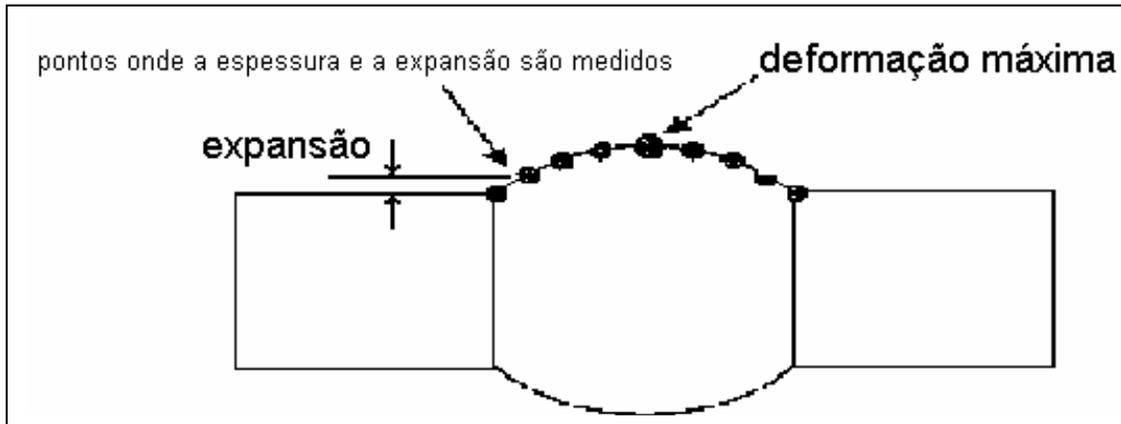


Figura 2. Pontos de medição.

4. Resultados e Discussão

Durante o segundo semestre de 2002 o bolsista deu maior enfoque à adequação do ferramental para a realização dos experimentos bem como à realização dos mesmos. O primeiro ponto a ser sanado foi a obtenção de corpos de prova adequados para uma primeira análise de funcionamento do ferramental. O material escolhido foi o alumínio AA 3033-H19 que é o material utilizado na fabricação de latas de refrigerante, fato este que facilitou a obtenção do mesmo. A grande dificuldade foi cortar o bocal e o fundo da lata sem danificar a mesma, para tanto foi utilizado uma ferramenta utilizada para cortar vidros. Agora, conforme mencionado em relatórios anteriores, o problema crítico no caso de ensaios de conformação hidrostática seria certamente a vedação, portanto a grande dúvida era se a primeira tampa criada seria suficiente para conter qualquer vazamento de fluido com uma decorrente queda de pressão ou se seria necessária a criação de um novo sistema de vedação conforme citado no relatório parcial. A primeira solução de vedação era mais simples e composta basicamente de um tarugo de PVC com anéis de borracha ao seu redor. Já na tentativa de realização dos primeiros ensaios percebeu-se que a solução não se demonstrava tão eficaz quanto aparentava. A tampa era de difícil colocação e acabava por danificar o tubo antes do mesmo ser conformado. Partiu-se então para a fabricação da segunda idéia que estava ainda no papel, fato este que acabou tomando mais tempo do que o previsto para que fosse possível dar início à realização dos ensaios devido ao tempo necessário para a usinagem da nova tampa. A tampa seria agora fabricada usando-se aço ABNT1020, a idéia original foi levemente alterada, mas o princípio básico era o mesmo: fabricar uma tampa que poderia ser colocada no interior do tubo sem interferência para posteriormente ser apertada garantindo a vedação (Figura 3). Tinha-se agora tudo pronto para o início dos ensaios. Em um primeiro momento a nova tampa criada mostrou-se efetiva em relação à vedação, porém percebeu-se que ela deslizava com a aplicação de pressões altas, fazendo com que a mesma “pulsasse” para fora da matriz antes de ocorrer a conformação do tubo. Para resolver tal problema foram usinadas pequenas barras de aço que serviriam tanto para impedir que as tampas saíssem da matriz assim como espécies de pés para o ferramental, facilitando assim a execução dos ensaios (ver figuras do ensaio em

anexo). Surgiria agora uma nova complicação: a pressão da bancada de óleo disponível para utilização no laboratório não seria suficiente para conformar o tubo com a eficácia esperada do modo como havia sido inicialmente fabricada a matriz. Nesse momento foram analisados quais os motivos para tal acontecimento. Para sanar tal problema optou-se primeiramente por encher o tubo utilizando-se da bancada de óleo até a pressão atingir seu máximo, depois a matriz seria levada a uma prensa onde as tampas seriam empurradas até a pressão interna aumentar de tal forma que permitisse a conformação completa do tubo (Dificultando na análise dos resultados, uma vez que dessa forma haveria um provável deslocamento axial das bordas do tubo). Para tanto foram feitas algumas adaptações para que a matriz pudesse ser colocada na prensa sem que se danificasse nenhuma de suas partes. Entretanto dadas às implicações resultantes de tal solução preferiu-se tentar simplesmente aumentar o raio interno de curvatura da matriz (ver desenho da nova tampa da matriz com o novo raio de curvatura em anexo), facilitando assim a conformação do tubo. Logo nos primeiros ensaios foi possível notar que dessa forma era possível sanar o problema da relativa falta de pressão interna, confirmando a tese de que o raio de curvatura é um dos parâmetros críticos da conformação hidrostática.

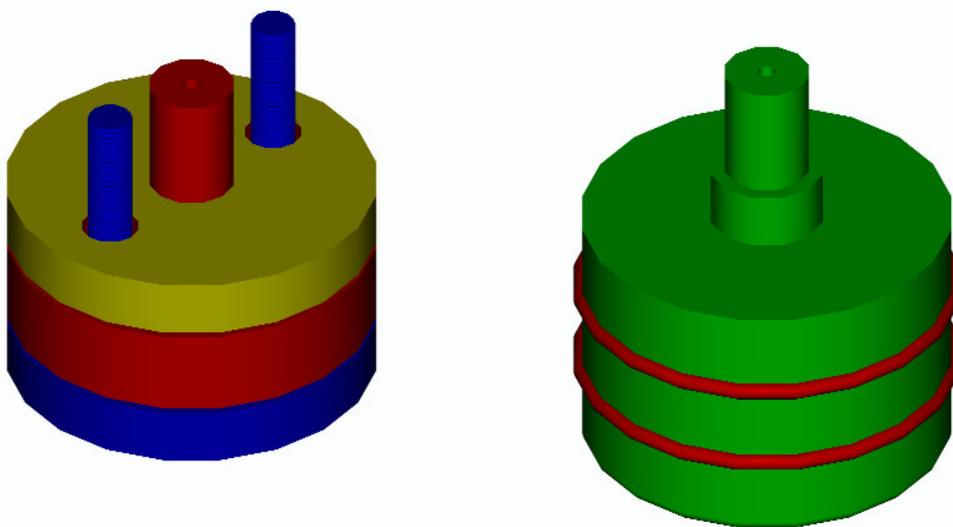


Figura 3. (a) Desenho da Tampa com o uso de um elastômero (b) Desenho da tampa com o uso de anéis de borracha (o-rings).

Outro item que merece ser citado é a construção pelo grupo de trabalho de uma célula de carga para a medição da força de atrito entre a parte em expansão do corpo de prova e a matriz, o que permitirá a escolha do melhor lubrificante nas próximas execuções, melhorando assim a qualidade do produto final. Esse projeto da célula de carga ficou a cargo da aluna Luciana Paula Reggiani que optou por desenvolver uma célula de carga para o matriz de hidroconformação com formato ‘T’ que vem também vêm sendo desenvolvido pelo grupo de trabalho uma vez que esse formato é mais favorável à utilização da célula de carga para a referida tomada de dados. Como a célula de carga medirá a força de atrito da parte em expansão do corpo de prova, decidiu-se alocá-la na parte inicialmente livre da

matriz em formato cilíndrico oco, de forma que o corpo de prova ao se deformar, expanda dentro da célula de carga.

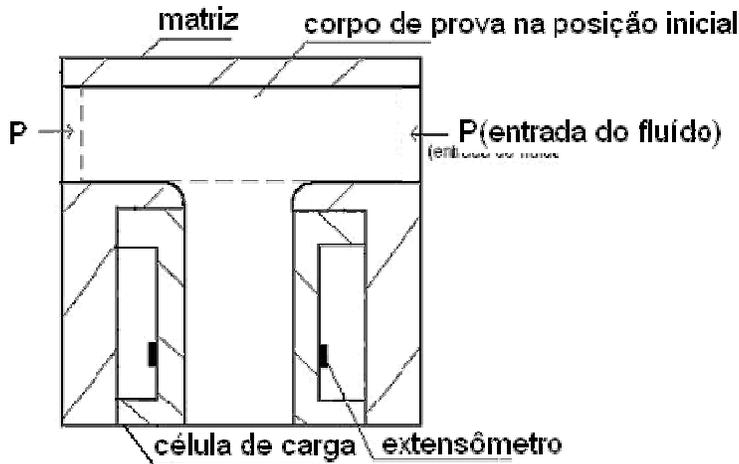


Figura 4. Matriz com a célula de carga.

Assim, conforme o corpo de prova estiver expandindo, irá aumentar a área de contato entre este e a célula de carga e uma força de atrito será imposta sobre a célula de carga. O cilindro, então, sofrerá uma pequena deformação, proporcional à força de atrito aplicada. Utilizando-se de extensômetros pode-se medir a variação na deformação e conseqüentemente medir a variação da força de atrito presente nesse instante do ensaio.

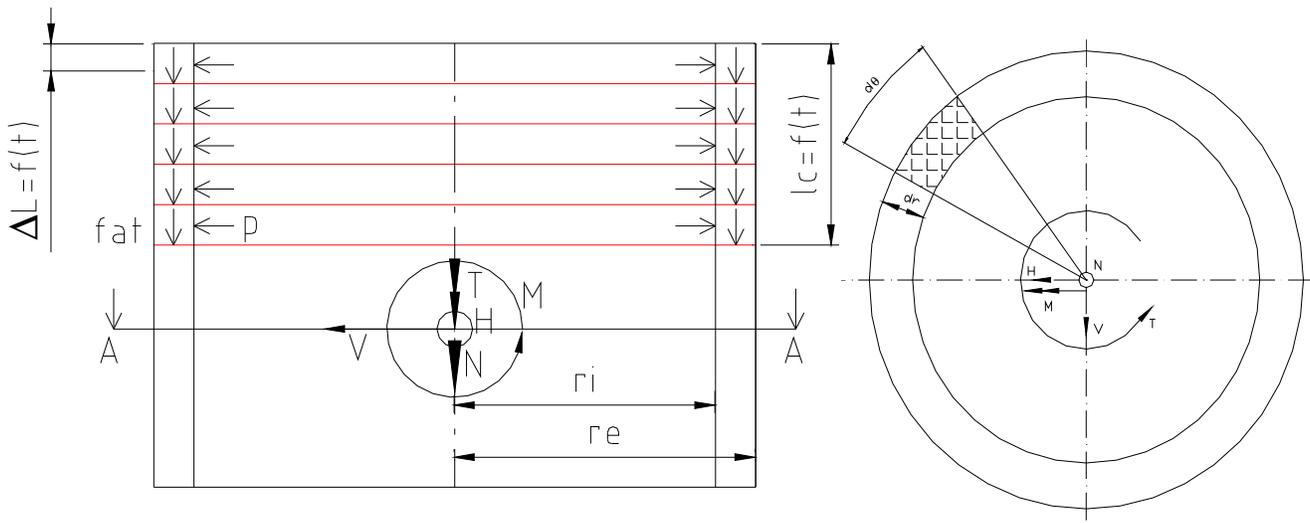


Figura 5. Esboço de parte do corpo da célula de carga e corte AA.

A soma das forças f_{at} da figura acima é a força normal que é aplicada na célula de carga na seção AA. Considerando que a seção AA está livre do contato com o corpo de prova, isto é, está abaixo do comprimento total de expansão do corpo de prova, pode-se calcular N da seguinte forma:

$$N = \int_0^{2\pi} \int_0^{l_c} \mu \cdot p \cdot r_i \, d\theta \, dx = \int_0^{l_c} \mu \cdot p \cdot r_i \, 2\pi \, dx$$

Onde:

$$\text{fat} = \mu \cdot N = \mu \cdot p$$

r_i é o raio interno

l_c é o comprimento de contato entre a célula de carga e o corpo de prova

A tensão normal aplicada é dada por:

$$\sigma_l = E \cdot \varepsilon_l,$$

Onde,

$$\varepsilon_l = \frac{\sigma_l}{E} = \frac{\Delta L_t}{L_0}$$

Mas como

$$\sigma_l = \frac{N}{A} = E \frac{\Delta L_t}{L_0}$$

onde

$$A = \pi(r_e^2 - r_i^2)$$

Pôde-se achar outra equação para a força N:

$$N = EA \frac{\Delta L_t}{L_0}$$

Comparando as equações tem-se:

$$EA \frac{\Delta L_t}{L_0} = 2\pi r_i \int_0^{l_c} \mu \cdot p \, dx$$

No limite máximo tem-se

$$N_{m\acute{a}x} = 2\pi r_i \int_0^{l_{cm\acute{a}x}} \mu \cdot p_{m\acute{a}x} \, dx$$

No limite máximo a força normal aplicada na célula de carga deve ter seu valor máximo igual à tensão de escoamento do material da célula de carga. Portanto

$$N_{m\acute{a}x} = N_y = S_y \cdot A$$

$$\Delta L = \Delta L_y$$

Sabendo que

$$N_y = EA \frac{\Delta L_y}{L_0}$$

Podem-se igualar as equações:

$$S_y \cdot A = EA \frac{\Delta L_y}{L_0}$$

$$\Delta L_y = \frac{S_y \cdot L_0}{E}$$

Para calcular a espessura mínima necessária (e) basta substituir os dados do projeto nas equações acima:

1) Dados do aço 1020: 2) Dados da célula de carga: 3) Dados estimados:

$$E_{a\acute{c}o} \cong 210GP$$

$$L_0 = 0,055 \, m$$

$$P_{m\acute{a}x} = 5 \cdot 10^6 \, Pa$$

$$S_y \cong 220MPa$$

$$r_i = 0,033 \, m$$

$$l_{cm\acute{a}x} = 0,04 \, m$$

$$\mu \text{ (aço-alumínio)} = 0,14$$

Substituindo os valores tem-se:

$$\Delta L_y = 5,762 \cdot 10^{-5} m$$

$$N_{máx} = 5.80568 N$$

Adotando coeficiente de segurança 8 (para evitar que a espessura seja muito pequena e de difícil manuseio)

$$\Delta L = 0,72 \cdot 10^{-5} m$$

$$\therefore A = 2,112 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$A = \pi(r_e^2 - r_i^2) = \pi((r_i + e)^2 - r_i^2) = \pi(2r_i e + e^2)$$

$$\therefore e = 1 mm$$

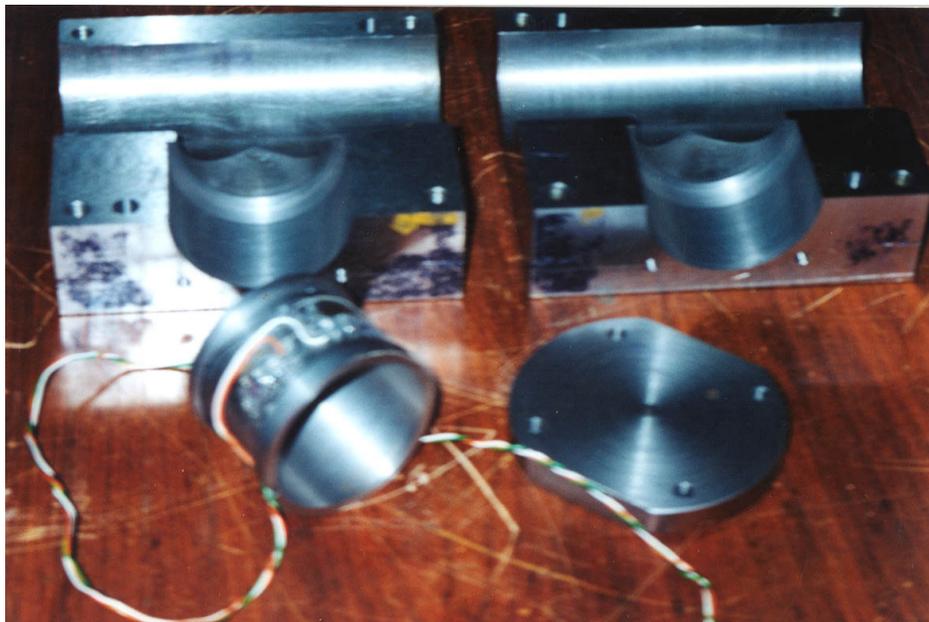


Figura 6. Célula de carga (à frente), matriz de conformação em ‘T’ (ao fundo).

O outro ferramental no qual o bolsista vem trabalhando em conjunto com um aluno de mestrado também evoluiu bastante e já se encontra em fase de aperfeiçoamento para que se possam realizar ensaios. Essa ferramenta consiste em uma espécie de matriz para a

realização do bulge-test ou teste de bojo. O experimento consiste na conformação de chapas de metais através da aplicação de fluido pressurizado. No ferramental criado a chapa é prensada no interior dessa matriz e há uma entrada de óleo na parte inferior da mesma. No ensaio, a borda de uma amostra circular ou retangular da chapa metálica em estudo é imobilizada através de matrizes na forma de anel. A borda da amostra é impedida de deslizar devido a uma cavidade de restrição, denominada popularmente de esticador ou quebra rugas, ou mesmo devido a uma grande área de contato com uma forte força aplicada. A seguir pressão hidráulica é aplicada na região central, em um dos lados da chapa, deformando-a na forma de uma cúpula. O formato dessa cúpula é determinado pelo formato de uma placa de aço com desenhos que variam desde um círculo de 100x100mm até uma elipse de 100x60mm.

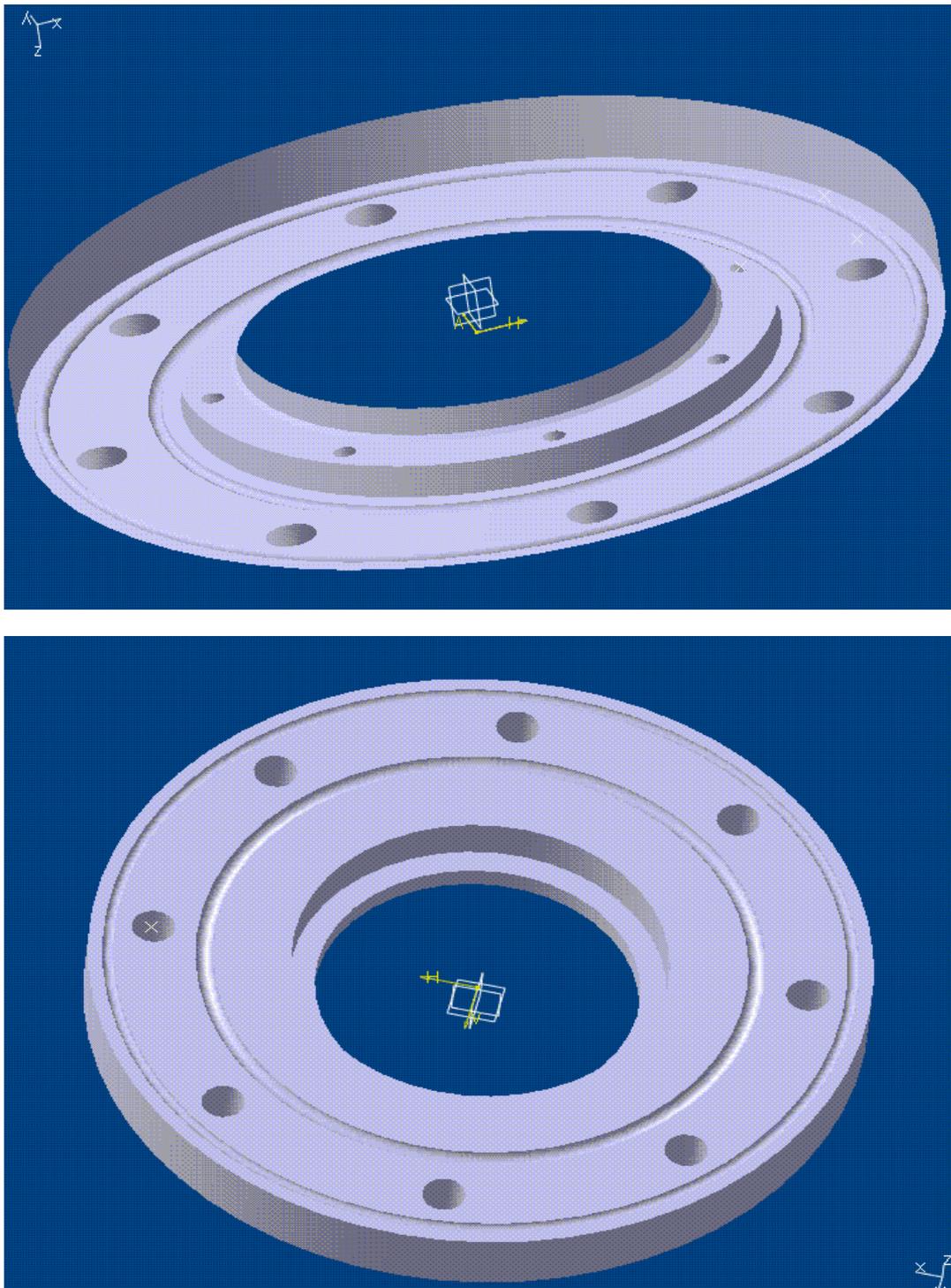
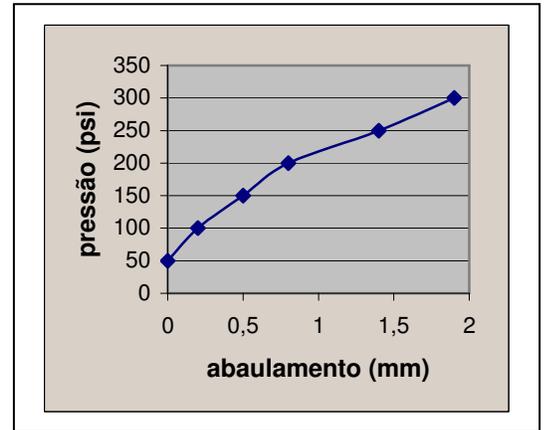
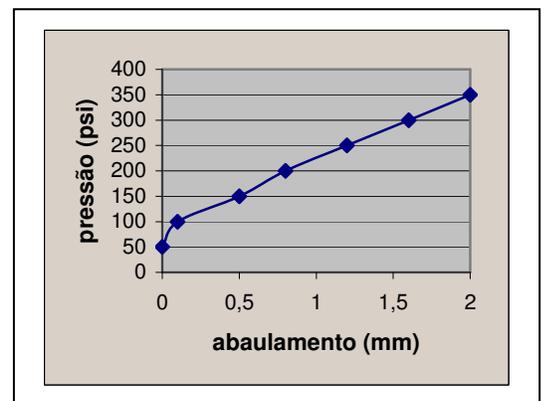


Figura7. Desenho em Catia do ferramental do “bulge-test que está sendo construído.

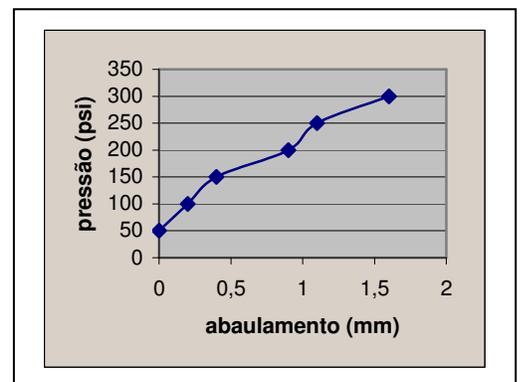
Pressão (psi)	Abaulamento (mm)
50	0
100	0,2
150	0,5
200	0,8
250	1,4
300	1,9
350	-



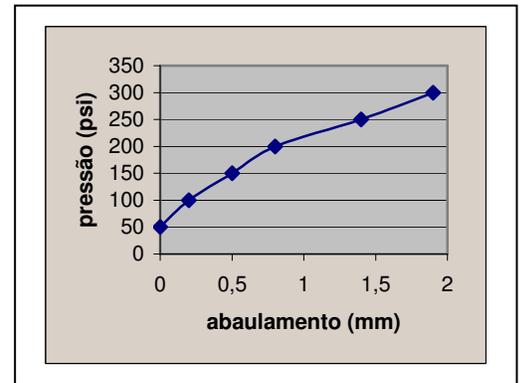
Pressão (psi)	Abaulamento (mm)
50	0
100	0,1
150	0,5
200	0,8
250	1,2
300	1,6
350	2,0



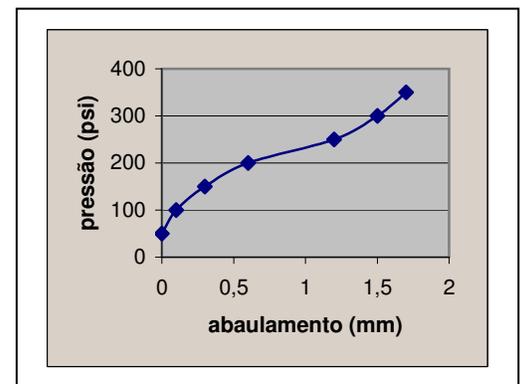
Pressão (psi)	Abaulamento (mm)
50	0
100	0,2
150	0,4
200	0,9
250	1,5
300	1,6
350	-



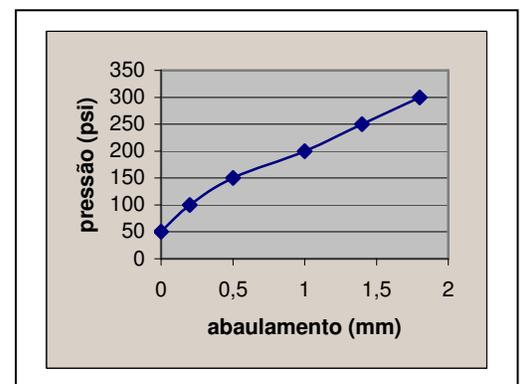
Pressão (psi)	Abaulamento (mm)
50	0
100	0,2
150	0,5
200	0,8
250	1,4
300	1,9
350	-



Pressão (psi)	Abaulamento (mm)
50	0
100	0,1
150	0,3
200	0,6
250	1,2
300	1,5
350	1,7



Pressão (psi)	Abaulamento (mm)
50	0
100	0,2
150	0,5
200	1,0
250	1,4
300	1,8
350	-



Análise dos resultados

Conforme mencionado anteriormente, houve vários ensaios que apresentaram resultados bem diferentes dos acima apresentados, o que demonstra a não adequação do material escolhido para análise. Porém o mesmo permitiu um teste muito bom de funcionalidade do ferramental e de alguns parâmetros tais como vedação e raio interno de curvatura. Um estudo mais detalhado dos dados acima permite, porém prever uma aproximação da pressão em que ocorre a ruptura do material, que é aproximadamente 350 psi. Nos ensaios realizados posteriormente foi aplicada uma pressão da ordem de 400 psi (acima da suposta pressão de ruptura) e se cronometrou o tempo transcorrido desde o início da aplicação da pressão até o momento de ruptura, a média desse tempo ficou em torno de 5 segundos, porém também nesse ensaio houve variações. O abaulamento máximo do tubo antes do rompimento ficou em aproximadamente 2mm na maioria dos ensaios.

Calibração da célula de carga

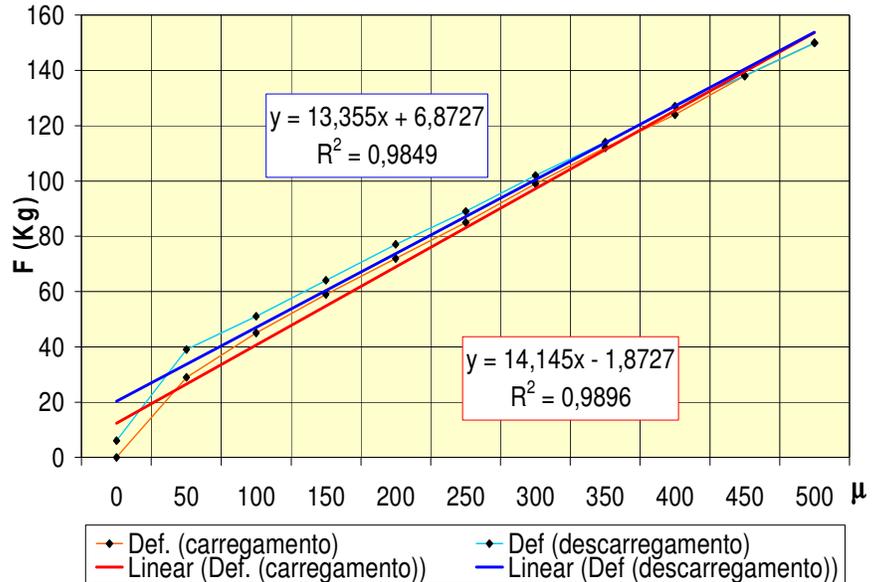
Abaixo estão apresentadas as tabelas e os gráficos da calibração:

a) Primeira calibração

Tabela 1

Kg	Def. Carr.	Def. Desc.
0	0	6
50	29	39
100	45	51
150	59	64
200	72	77
250	85	89
300	99	102
350	112	114
400	124	127
450	138	138
500	150	150

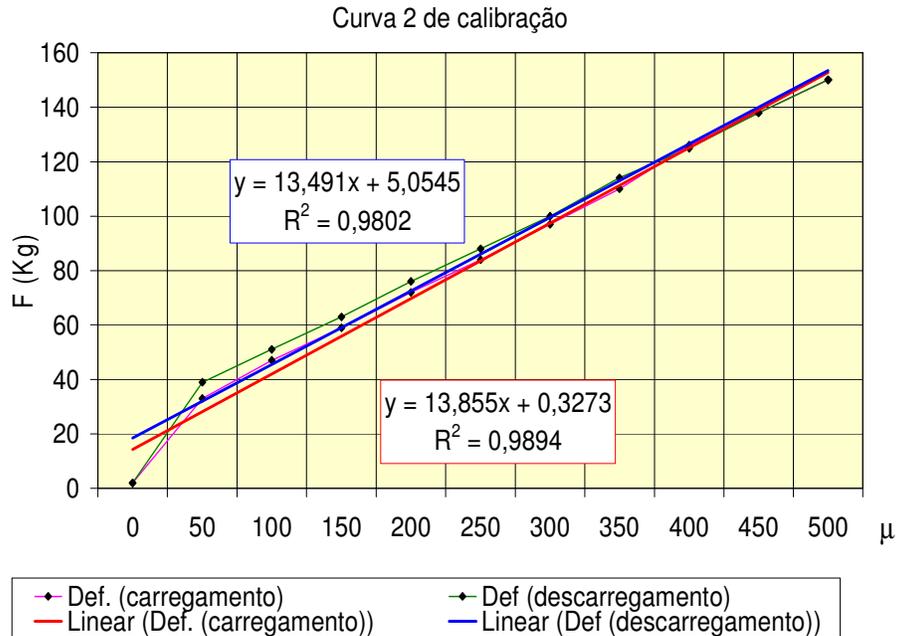
Curva 1 de calibração



b) Segunda Calibração

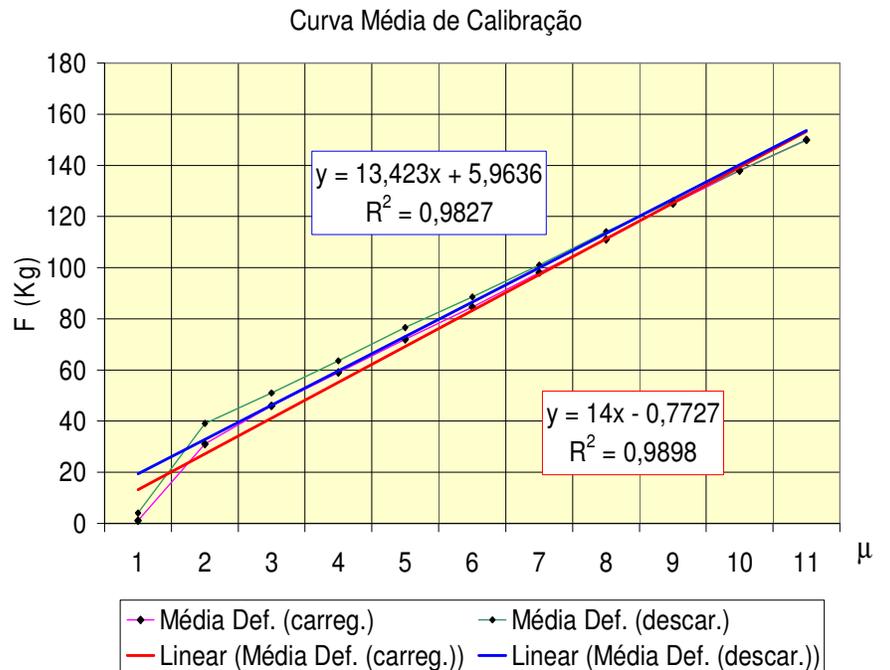
Tabela 2

Kg	Def Carr	Def Desc
0	2	2
50	33	39
100	47	51
150	59	63
200	72	76
250	84	88
300	97	100
350	110	114
400	126	125
450	138	138
500	150	150



c) Média entra a primeira e a segunda calibração

Kg	Média Carreg.	Média Desc.
0	1	4
50	31	39
100	46	51
150	59	63,5
200	72	76,5
250	84,5	88,5
300	98	101
350	111	114
400	125	126
450	138	138
500	150	150



Como se pode perceber pelos pontos e pelas equações, as três tabelas e os três

gráficos têm valores muito próximos, o que mostra que a célula de carga tem uma resposta linear e constante. Portanto conclui-se que a célula de carga apresentará resultados confiáveis a cada medida e terá um tempo de vida útil de aproximadamente 1 ano (limitado apenas pela cola dos extensômetros).

5. Conclusões

O projeto de iniciação científica como um todo obteve êxito uma vez que permitiu a fabricação de um ferramental eficaz de pequena escala para estudos universitários do processo de conformação hidrostática. De um modo geral pode-se afirmar que os objetivos foram todos alcançados destacando aqui o desenvolvimento, desde a etapa de planejamento até a fabricação do ferramental e de seus componentes e a resolução dos problemas que surgiram no decorrer do projeto. No caso da conformação hidrostática o ferramental encontra-se pronto e com eficácia aprovada durante os ensaios realizados, o que leva a crer que em breve poderão ser também realizados testes utilizando diferentes materiais (aço, por exemplo) e variações mais precisas de parâmetros tais como lubrificação interna da matriz e espessura do tubo a ser conformado. Quanto ao ferramental para o “bulge-test” pode-se afirmar que ele encontra-se praticamente pronto faltando apenas ajustes e acabamentos referentes a vedação e ao método de prensar as chapas para que essas não se movam durante o ensaio (o que facilita muito a análise dos resultados). O estudo como um todo se mostrou muito promissor e também de grande utilidade e importância para a formação do aluno. Como pontos fortes da pesquisa pode-se também citar a parte computacional para a simulação por elementos finitos, que não fazia parte do programa inicial da iniciação científica, mas que foi, porém utilizada em um primeiro momento para prever alguns resultados referentes ao comportamento previsto para o “bulge-test”. Foi possível perceber através do contato com grandes firmas que esse processo é de essencial importância, e ainda mais importante é verificar a correção do método de elementos finitos com a realidade, portanto esse estudo numérico deve continuar em um trabalho futuro principalmente para efeito de comparação de resultados. Outro ponto interessante a ser citado é o fato da iniciação científica ter ajudando bastante o aluno tanto na fixação de matérias já estudadas em semestres anteriores como no entendimento de matérias que estão sendo cursadas, em especial no caso de matérias como mecânica dos solos, resistência dos materiais, manufatura mecânica, projeto, materiais para engenharia, fabricação mecânica, elementos de máquinas onde a aplicação do conhecimento obtido é imediata e também em matérias como cálculo numérico e cálculo devido aos métodos numéricos envolvidos. Conforme citado acima ainda há muito terreno para a continuação do projeto, detalhes como a variação de parâmetros ou mesmo uma instrumentação mais precisa do material são temas que não se encontram ainda totalmente resolvidos e merecem atenção especial em estudos futuros.

Agradecimentos

FAPESP, Engenheiro Jorge Paiva Abrantes, alunos Guilherme Cruz Rossi, Antonio

Garibaldi Giovanini Junior e Luciana Paula Reggiani, técnicos da oficina do departamento de engenharia mecatrônica e de sistemas mecânicos.

Referências Bibliográficas

- [1] Asnafi N., Analytical modelling of tube hydroforming; *Thin-Walled Structures*, 34 (1999) 295-330
- [2] Dohmann F., Hartl C. Tube hydroforming-research and practical application; *Journal of Materials Processing Technology*, 71 (1997) 174-186
- [3] Ahmetoglu M., Sutter K., Li X.J., Altan T.; Tube hydroforming: current research and need for training; *Journal of Materials Processing Technology*, 98 (2000) 224-231
- [4] Koç M., Altan T.; Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process; *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42 (2002) 123-138
- [5] Vollertsen F.; Accuracy in process chains using hydroforming; *Journal of Materials Processing Technology*, 103 (2000) 424-433
- [6] Siegert K., Häussermann M., Lösch B., Rieger R.; Recent developments in tube technology; *Journal of Materials Processing Technology*, 98 (2000) 251-258
- [7] Sokolowski T., Gerke K., Ahmetoglu M, Altan T.; Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tubes; *Journal of Materials Processing Technology*, 98 (2000) 34-40
- [8] Bortolussi R.; Análise numérica e experimental da hidroconformação de produtos tubulares; Tese de doutorado; Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Materiais e Processos
- [9] Carleer B. D.; Finite element analysis of deep drawing; PhD-Thesis, University of Twente, The Netherlands; March 1997
- [10] Kleemola H. J. e Ranta-Eskola A. J., On the Determination of Biaxial Stress-Strain Curves and Forming Limit Diagrams by Hydraulic Bulging; *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 5 (1976), 124-128.
- [11] Mac Donald B. J., Hashmi M. S. J.; Finite element simulation of bulge forming of a cross-joint from a tubular blank; *Journal of Materials Processing Technology*, 103 (2000) 333-342
- [12] Ducan J. L., Kolodziejski J. and Glover J.; Bulge Testing as an Aid to Formability Assessment; *Sheet Metal Forming and Energy Conservation*, Journal
- [13] Taylor, B.; Formability Testing of Sheet Metals; *ASM Metals Handbook*, 9th Ed.,

1990.

[14] Sachs G., Esprey G. e Kasik G. B.; Circular Bulging of Aluminum Alloy Sheet at Room and Elevated Temperatures; Trans. ASME, Vol. 68, 1946, p. 161.

[15] Brown W. F. and Sachs G.; Strength and Failure Characteristics of Circular Membranes; Trans. ASME, Vol. 10, 1948, p. 241.

[16] Lankford W. F.; Hydraulic Bulge Testing of Sheet Metals; ASTM Symp. on the Deformation of Metals as Related to Forming and Service – June 22, 1948, ASTM Special Tech. Pub., No. 87, p. 66.

[17] Hill R.; A Theory of the Plastic Bulging of a Metal Diaphragm by Lateral Pressure; Phil. Mag., Ser. 7, Vol. 41, No. 322, 1950, p. 1133.

[18] Jovignot C.; Method and Apparatus for Obtaining Extension and Load at Failure of Sheet Metal Products; Rev. de Met., Vol. 27, 1930, p. 443.

[19] Usugi T., Akkus N., Kawahara M., Nishimura H.; An Analytical Model of the Superplastic Bulge Forming of Sheet Metal; Materials Science Fórum Vols. 304-306 (1999) pp. 735-740

[20] Hosford, W. F. e Caddell, R. M. – Metal Forming – Mechanics and Metallurgy, 2nd. Ed., Ed. PTR Prentice Hall, EUA, 1993.

[21] Ogura, T., Ueda, T. e Takagi, R. – On the application of a Hydraulic Bulging Process, Industrie Anzeiger, 88, 1966, pp. 769-772, 1001-4.

[22] Pearce, R. – Sheet Metal Forming, IOP Publishing Ltd, Inglaterra, 1991.

[23] Hill, R. The mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, 1950.

[24] Johnson, W. e Mellor, P. B., Engineering Plasticity, Van Nostrand, Princeton-NJ, 1973.

[25] Dohmann F., Meyer W., Tribologie der Innenhochdruck-umformung, Blech Rohre Profile, 10/87

[26] Rodrigues, M. Desenvolvimento e ensaio de transdutor multicomponente para medição de força e momento. São Paulo, 1999.

[27] Martins, João Alcino de Andrade. Introdução à extensometria – PNV 723- Extensômetro Elétrico de resistência variável. Apostila da Escola Politécnica-USP, Março/1983

ANEXO 1

Simulação realizada no software Adyna para o caso de conformação hidrostática para o caso de abaulamento uniforme

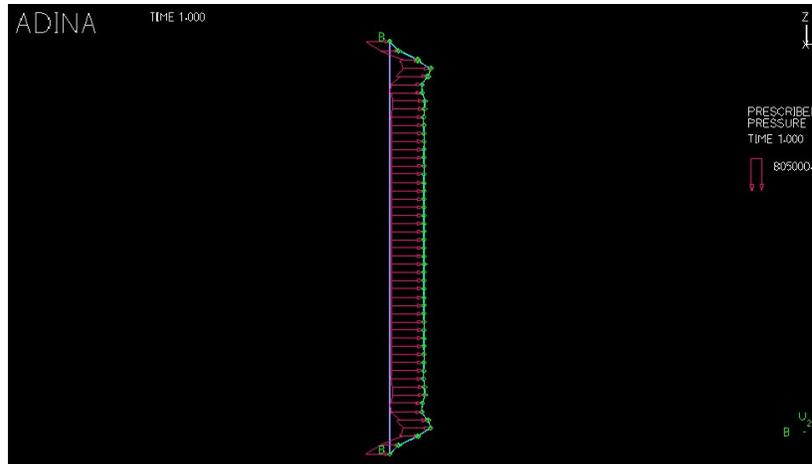


Figura 1 - carregamentos

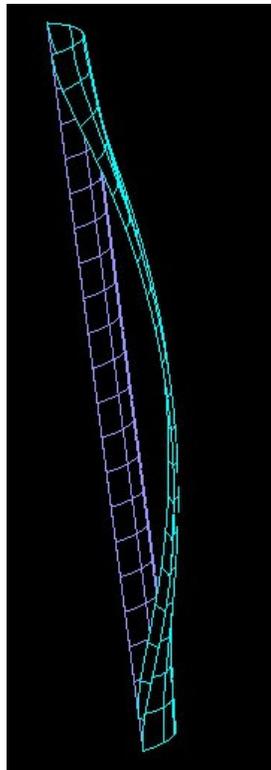


Figura 2 abaulamento do tubo

ANEXO 2

Resultado da simulação computacional através do software Dynaform - LSDYNA para um dos ensaios de expansão hidráulica que se deseja realizar.

Condições:

Matriz circular com raio 70 mm.

Material: IF 18

Espessura do Material: 0.8 mm

Propriedades do Material

$n = 0.229$

$K = 0.566 \text{ KN/mm}^2$

$r_{00} = 1.79$

$r_{45} = 1.98$

$r_{90} = 2.43$

Pressão de Falha: 7.07 MPa

Nas figuras a seguir é possível acompanhar o progresso de um teste de expansão hidráulica, onde é possível perceber a evolução da conformação que está ocorrendo ao blank (em azul) com o passar do tempo até o momento da ruptura. Em seguida verifica-se a distribuição da espessura ao decorrer do tempo, bem como os pontos onde começa a ocorrer a ruptura (diagrama CLC).

Na figura 1 está mostrado o modelo em Elementos finitos do blank, da matriz e do prensa chapas que foi discretizado para a análise em questão. O modelo mostrado tem forma circunferencial de raio de abertura de 100 mm. Além desse modelo estão também sendo modelados modelos em formatos elípticos de maneira a obter-se outros caminhos de deformação na condição de estiramento, afim de obter-se a Curva Limite de Conformação. Modelou-se apenas um quarto do modelo para a redução do tempo de cálculo, isso é possível devido à simetria do modelo. A matriz e o prensa chapas foram modelados como corpos rígidos. Foram estabelecidos critérios de contato entre o blank e a matriz e entre o blank e o prensa chapas. Neste contato definiu-se o coeficiente de atrito estático e dinâmico como sendo constante de valor 0.125. Cada elemento do blank possui aproximadamente casca de 5 mm. Já os elementos da matriz e do prensa chapas são um pouco maiores.

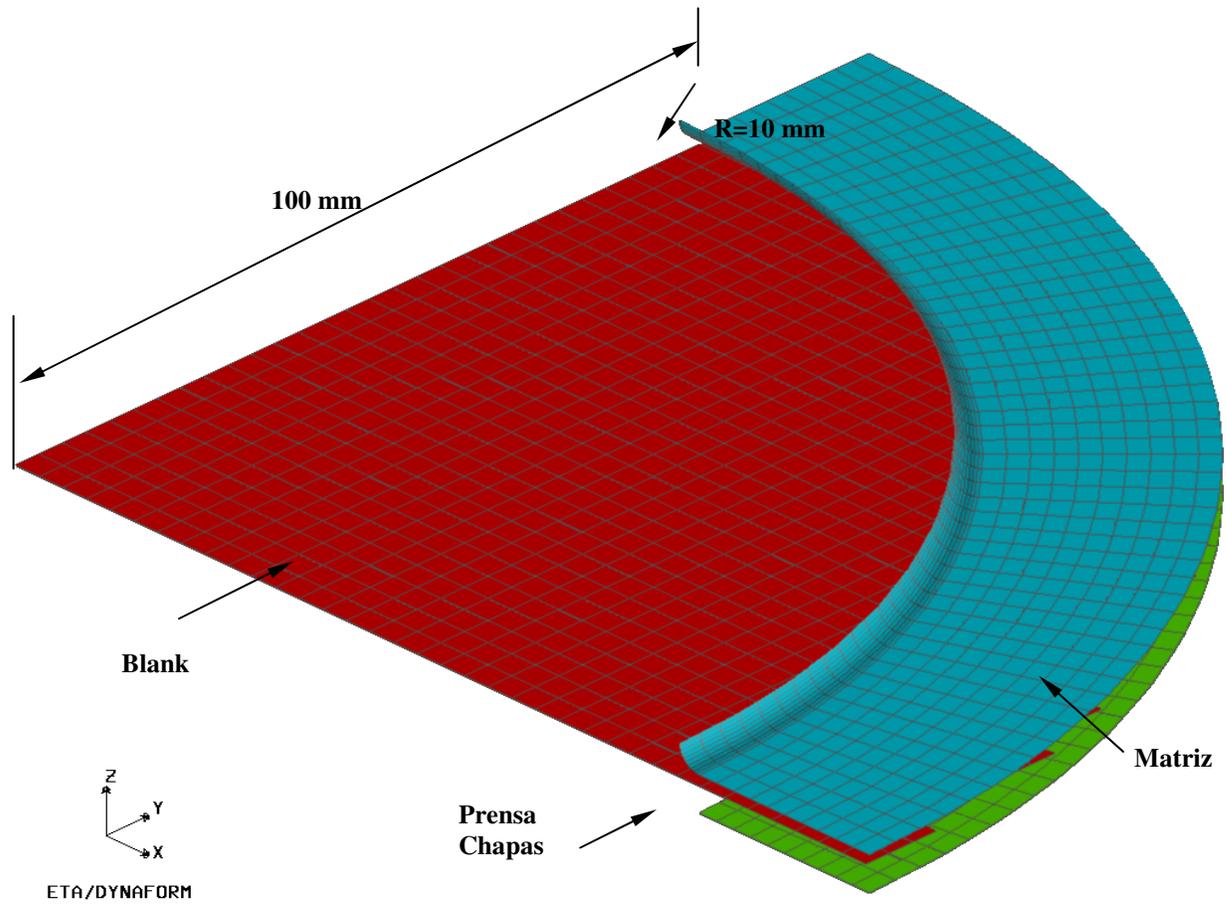
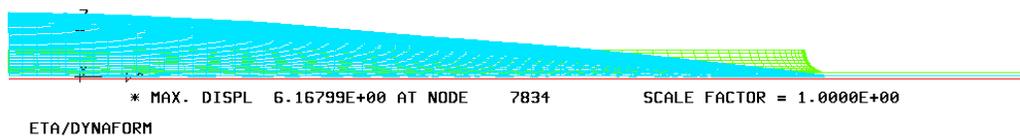
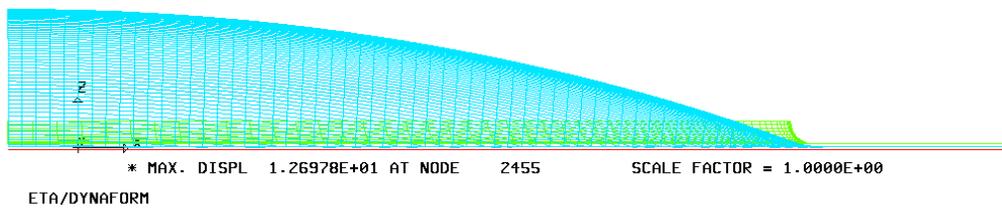


Figura 1 – Modelo em Elementos Finitos para Circunferência de Raio 100 mm

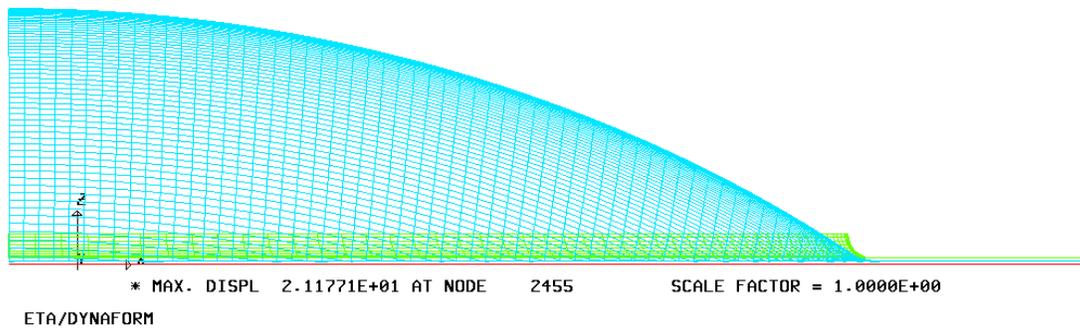
STEP 6 TIME = 2.9998994E+00



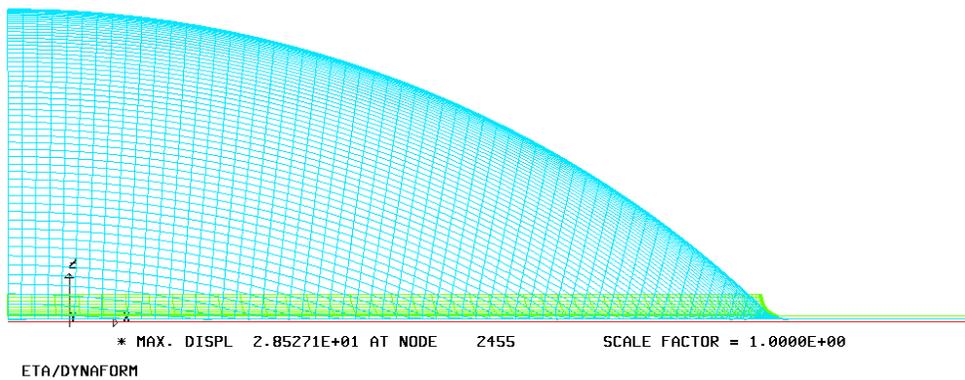
STEP 20 TIME = 1.1399887E+01



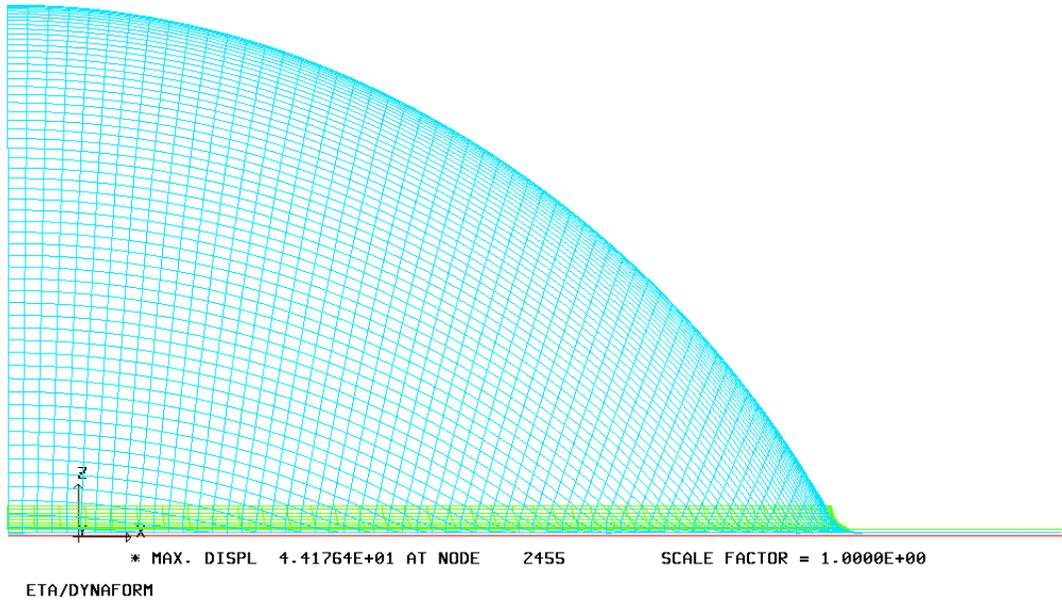
STEP 37 TIME = 2.1599941E+01



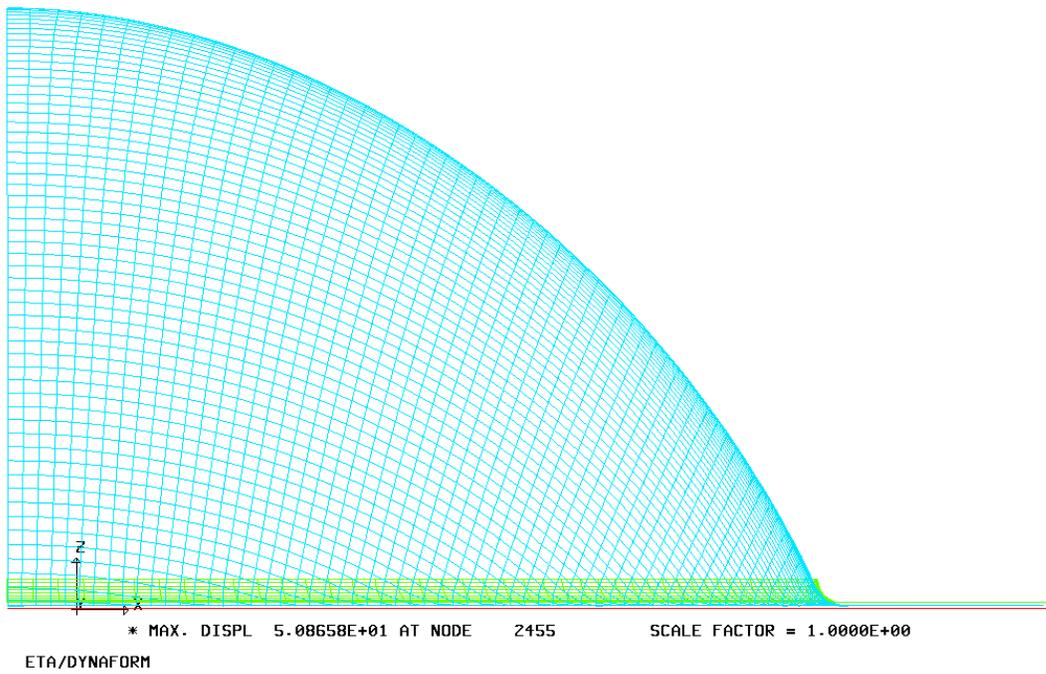
STEP 49 TIME = 2.8799931E+01



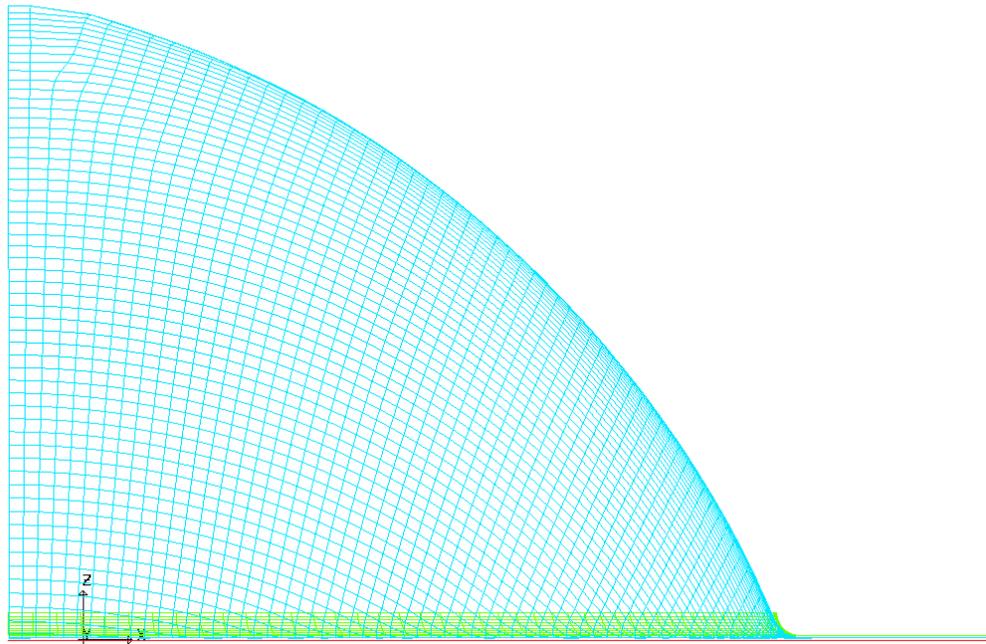
STEP 63 TIME = 3.5624901E+01



STEP 67 TIME = 3.5924896E+01



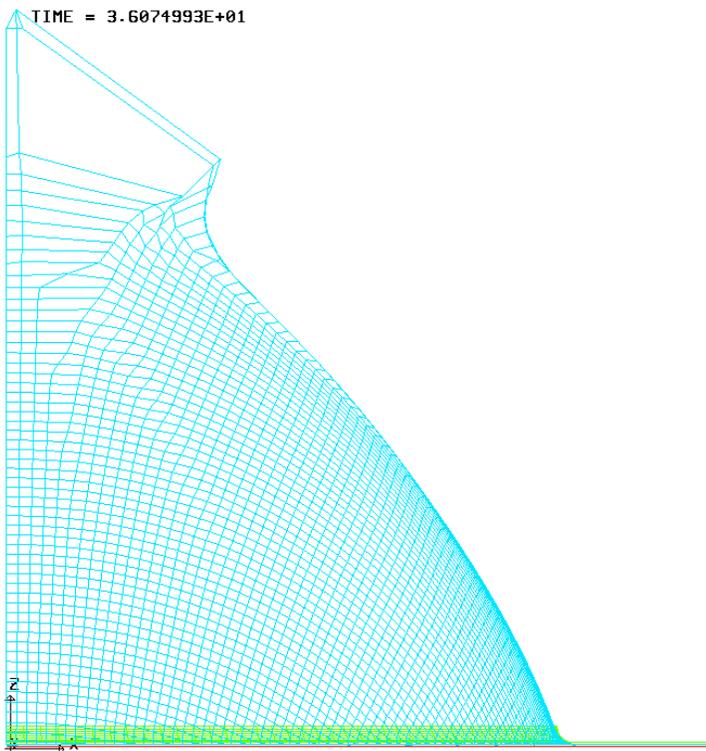
STEP 7 TIME = 3.5999947E+01



* MAX. DISPL 5.66319E+01 AT NODE 2455 SCALE FACTOR = 1.0000E+00

ETA/DYNAFORM

STEP 69 TIME = 3.6074993E+01

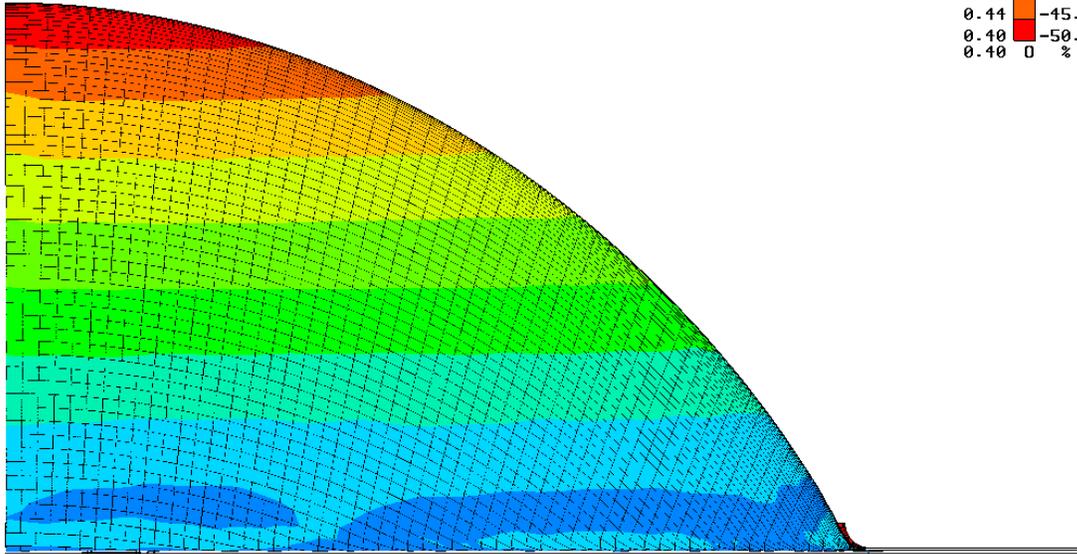


* MAX. DISPL 9.16476E+01 AT NODE 7833 SCALE FACTOR = 1.0000E+00

ETA/DYNAFORM

LS-DYNA user input
 STEP 64 TIME = 3.5699947E+01
 THICKNESS (BLANK INITIAL MEAN THICKNESS 0.800000)

0.80	* %	0.14
0.76		-4.92
0.72		-9.98
0.68		-15.05
0.64		-20.11
0.60		-25.17
0.56		-30.24
0.52		-35.30
0.48		-40.37
0.44		-45.43
0.40		-50.49
0.40		0 %

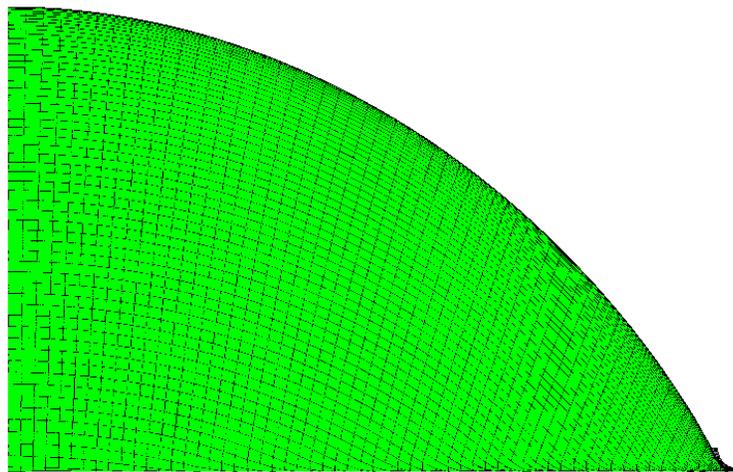
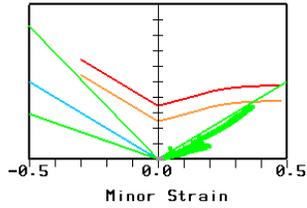


ETA/DYNAFORM

LS-DYNA user input
 STEP 64 TIME = 3.5699947E+01
 BOTTOM

- Cracks
- Risk of Cracks
- Safe
- Insuff. Stretching
- Wrinkling Trend
- Wrinkles

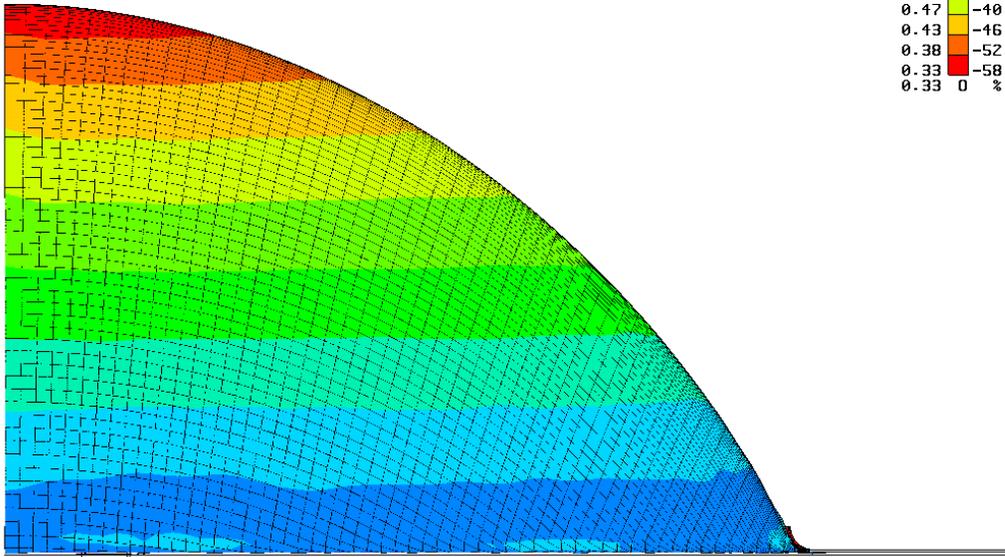
Major Strain(True FLD)
 1.0



ETA/DYNAFORM

LS-DYNA user input
 STEP 66 TIME = 3.5849850E+01
 THICKNESS (BLANK INITIAL MEAN THICKNESS 0.800000)

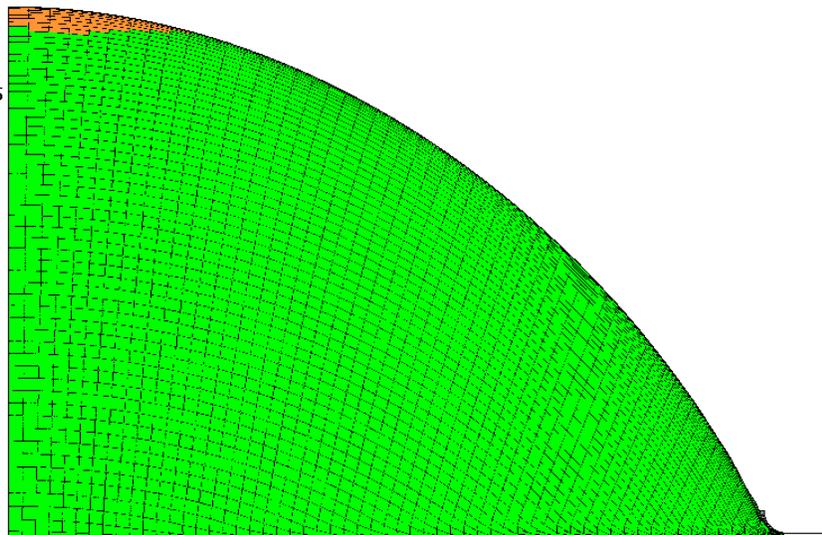
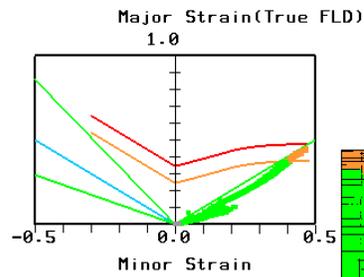
0.80	* %	0.14
0.80		-5.72
0.75		-11.57
0.71		-17.43
0.66		-23.29
0.61		-29.15
0.57		-35.01
0.52		-40.87
0.47		-46.73
0.43		-52.58
0.38		-58.44
0.33		0 %



ETA/DYNAFORM

LS-DYNA user input
 STEP 66 TIME = 3.5849850E+01
 BOTTOM

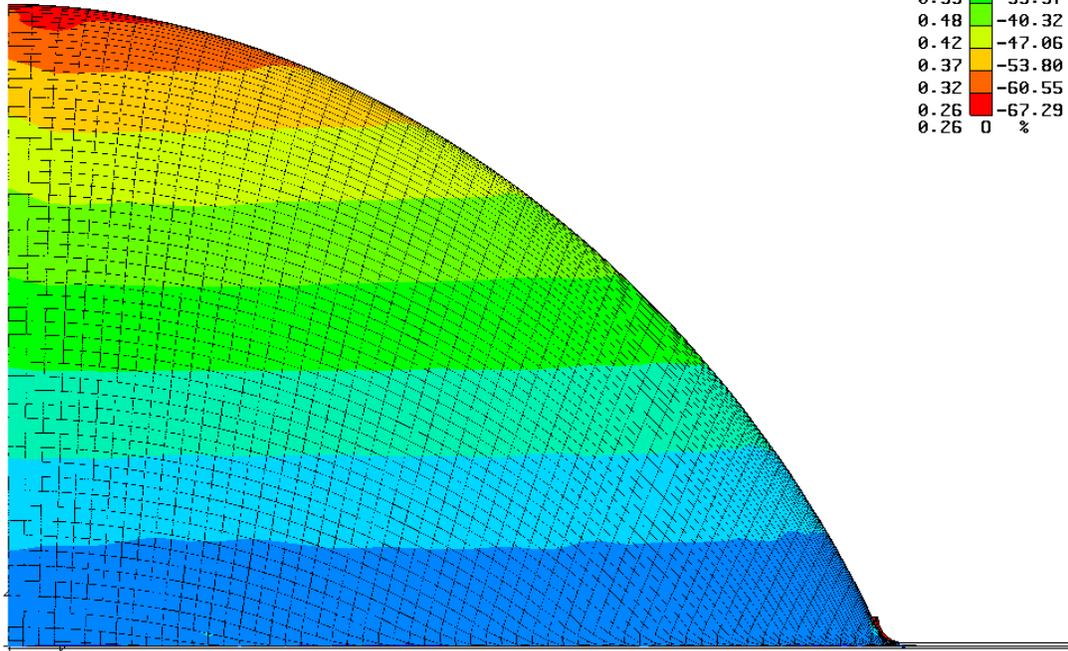
Red	Cracks
Orange	Risk of Cracks
Green	Safe
Grey	Insuff. Stretching
Blue	Wrinkling Trend
Pink	Wrinkles



ETA/DYNAFORM

LS-DYNA user input
 STEP 67 TIME = 3.5924896E+01
 THICKNESS (BLANK INITIAL MEAN THICKNESS 0.800000)

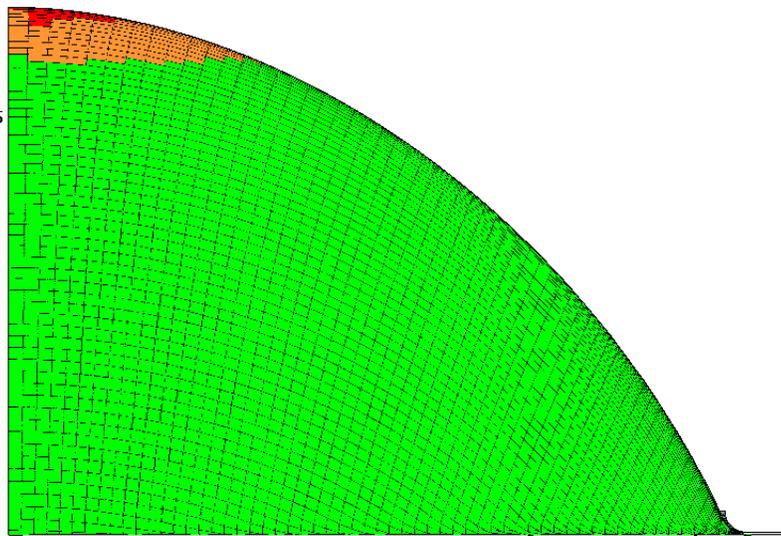
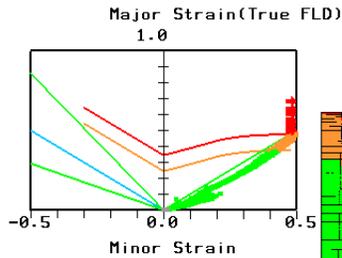
0.80	* %	0.14
0.80		-6.60
0.75		-13.34
0.69		-20.09
0.64		-26.83
0.59		-33.57
0.48		-40.32
0.42		-47.06
0.37		-53.80
0.32		-60.55
0.26		-67.29
0.26		0 %



ETA/DYNAFORM

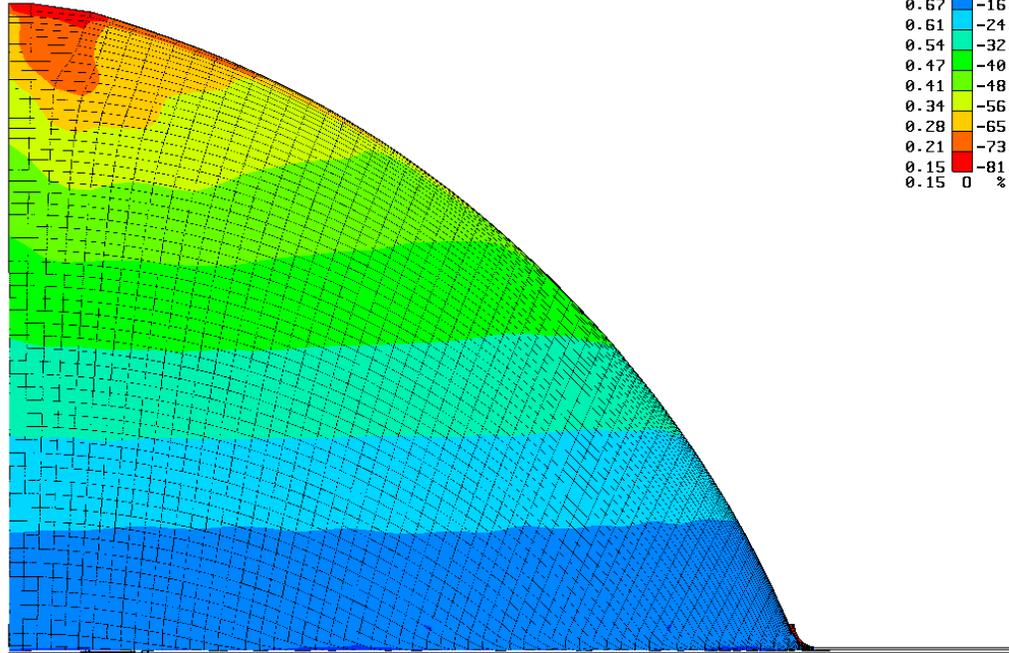
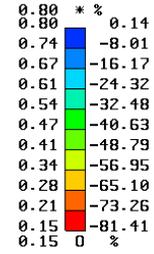
LS-DYNA user input
 STEP 67 TIME = 3.5924896E+01
 BOTTOM

- Cracks
- Risk of Cracks
- Safe
- Insuff. Stretching
- Wrinkling Trend
- Wrinkles



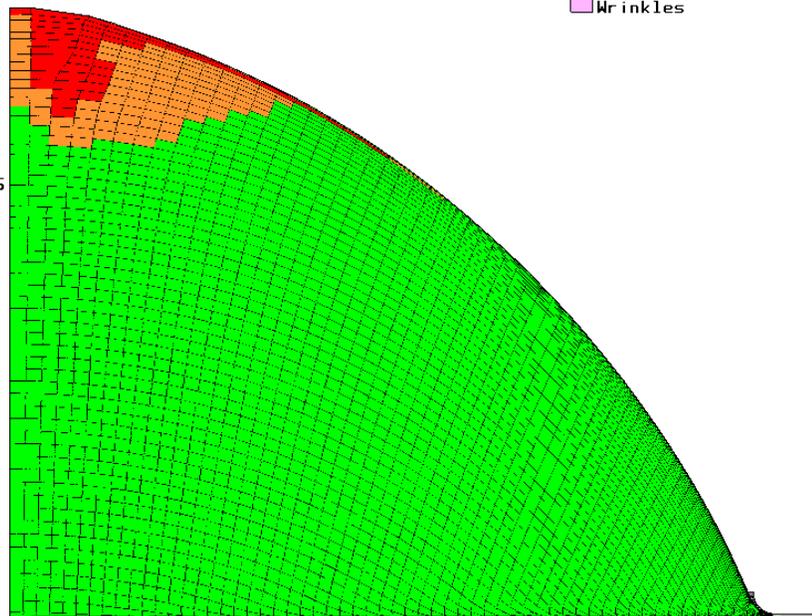
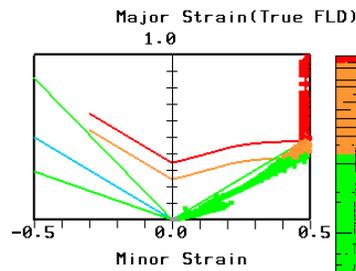
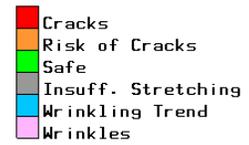
ETA/DYNAFORM

LS-DYNA user input
 STEP 68 TIME = 3.5999947E+01
 THICKNESS (BLANK INITIAL MEAN THICKNESS 0.800000)



ETA/DYNAFORM

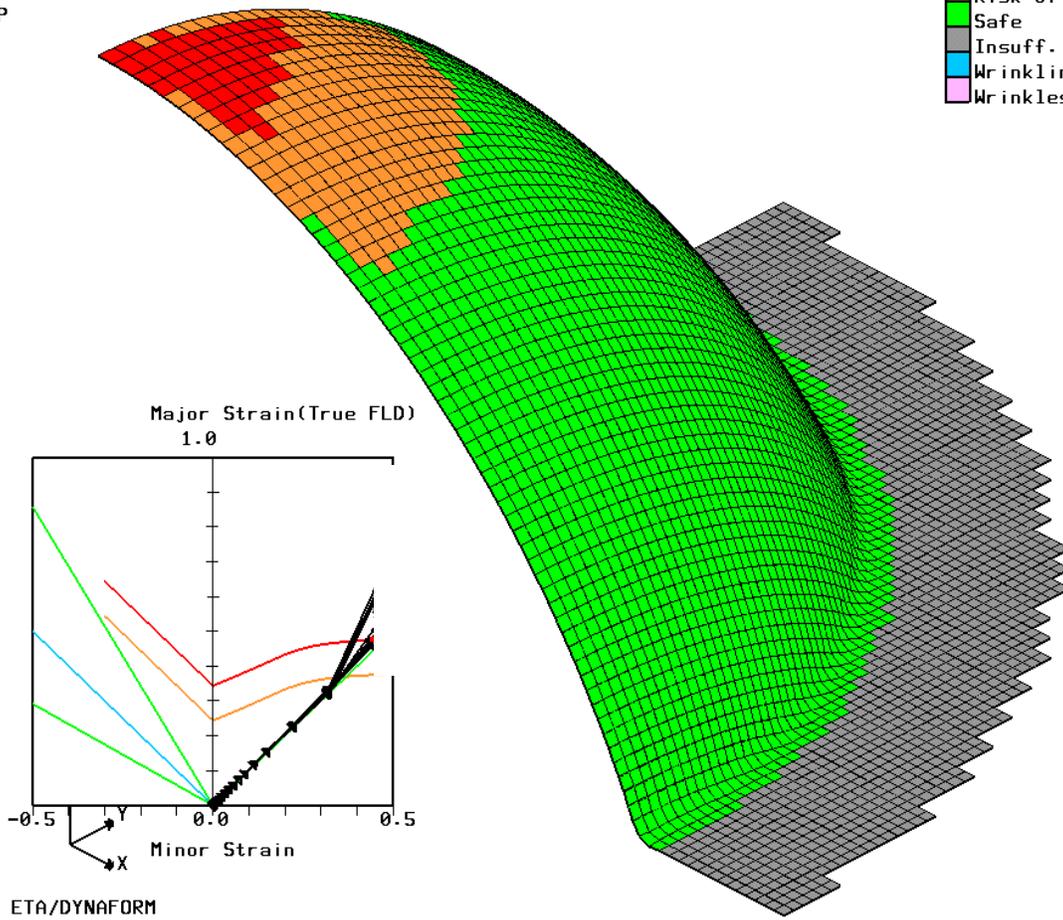
LS-DYNA user input
 STEP 68 TIME = 3.5999947E+01
 BOTTOM



ETA/DYNAFORM

LS-DYNA user input
STEP 67 TIME = 3.5924896E+01
TOP

- Cracks
- Risk of Cracks
- Safe
- Insuff. Stretching
- Wrinkling Trend
- Wrinkles



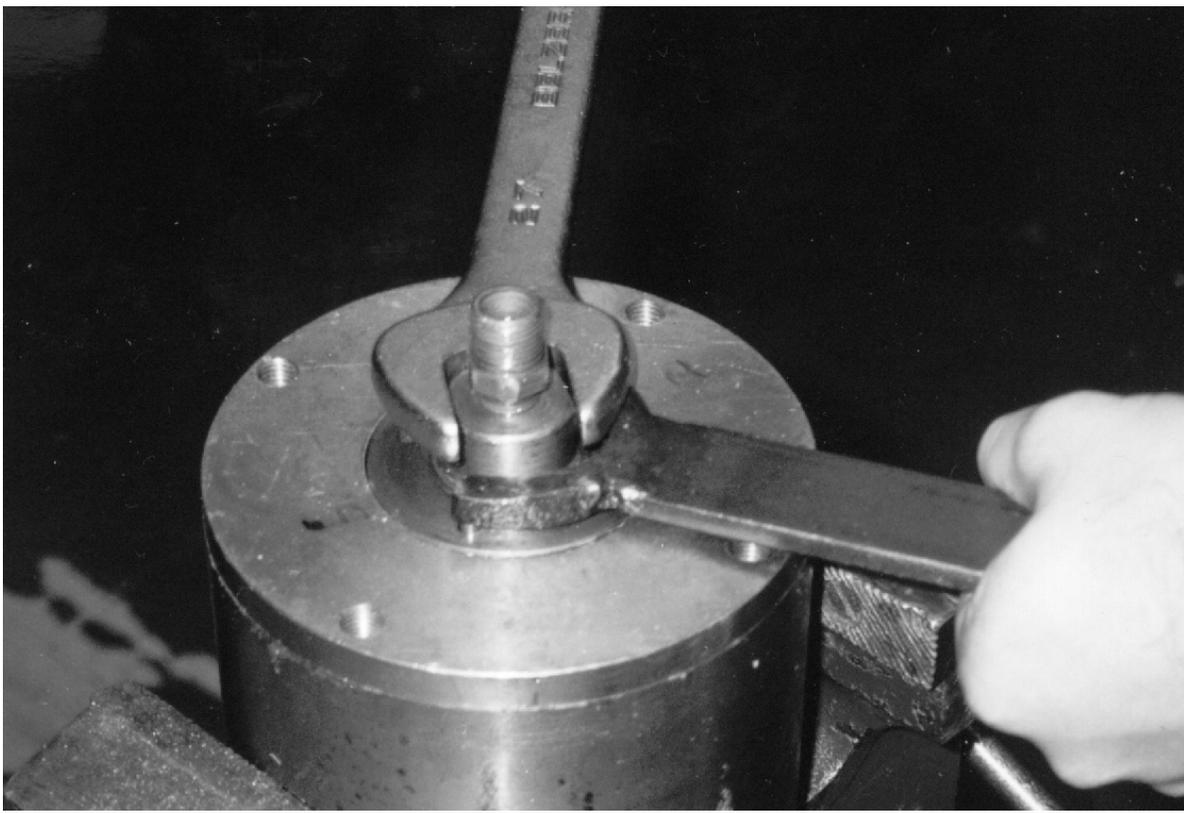


Figura 9.2 - (a) Dispositivo construído para expansão hidráulica equiaxial de peças tubulares.
(b) Tampa de vedação sendo apertada

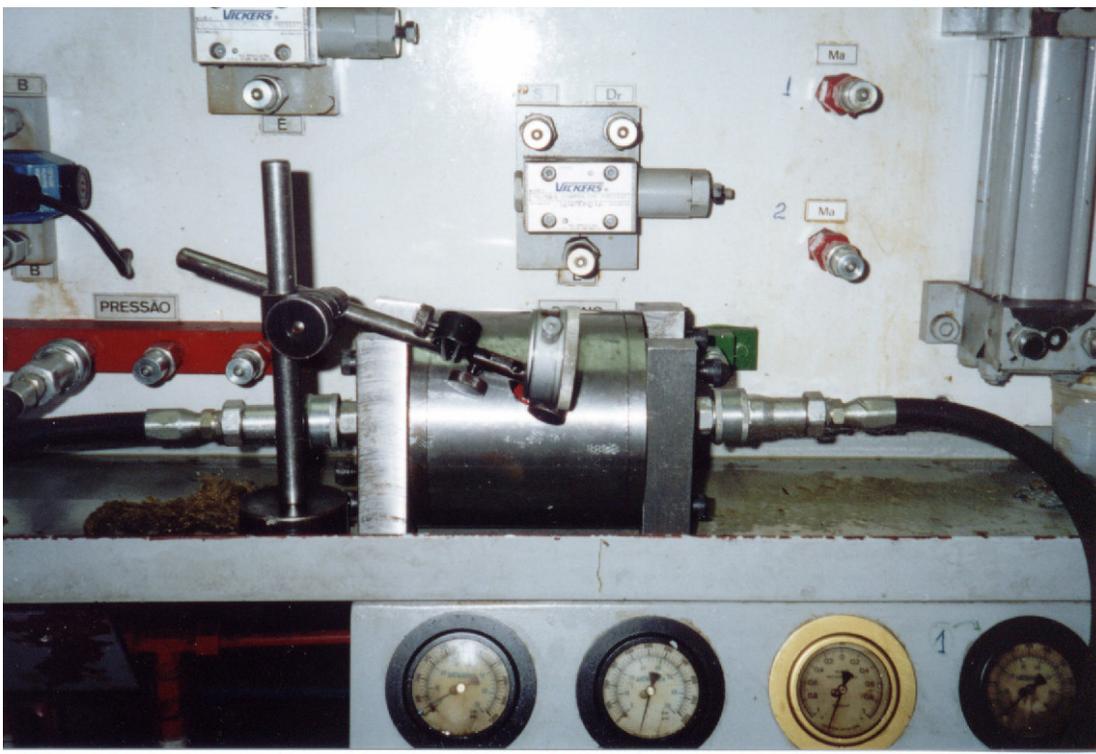
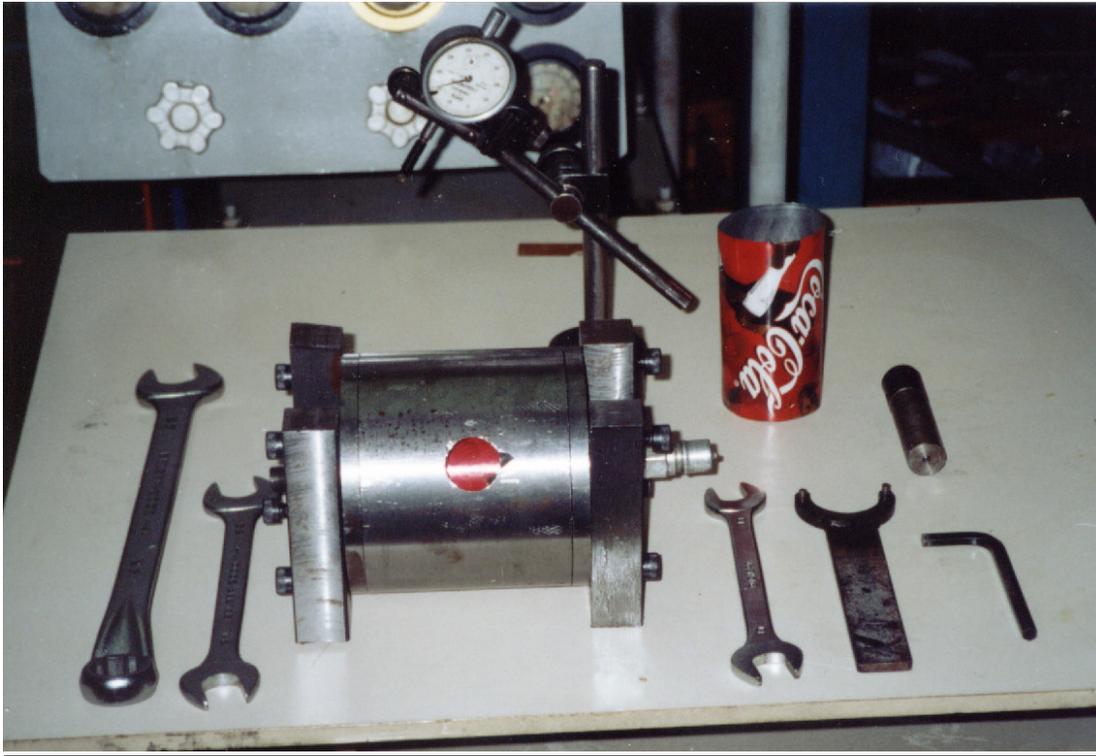


Figura 9.3 - (a) Ferramental construído e ferramentas utilizadas no ensaio
(b) Ensaio em andamento



Figura 9.4 - (a) Ferramental aberto após a realização do ensaio
(b) Corpos de prova deformados até sua ruptura

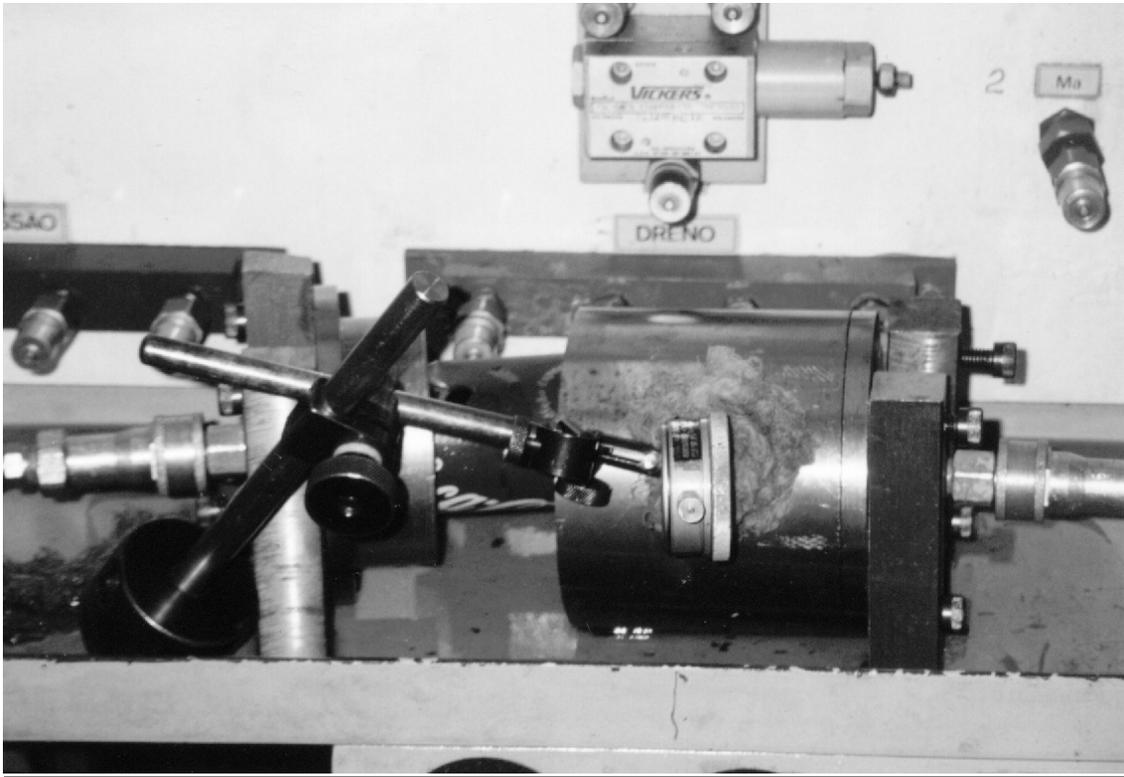


Figura 1.5 - (a) Falha ocorrida em um dos ensaios (tampa da matriz soltou)
(b) ferramental de “bulge-test” após pequenas modificações