

Dispositivo de Conformação Hidrostática de Chapas

Branca Ballot de Miranda

branca_miranda@hotmail.com

Resumo. O presente trabalho procura estudar a conformação de chapas metálicas através do ensaio de expansão hidrostática (“bulge test”) para promover a melhoria do processo de hidroconformação, que permite a produção de geometrias muito complexas, usando tubos ou chapas, com a redução de componentes e junções. Este processo permite a otimização dos processos e a minimização dos custos da indústria de conformação, tornando o conhecimento de seus parâmetros muito importante. A metodologia adotada nos ensaios envolve uma constante monitoração da pressão, da altura e da espessura da chapa metálica no pólo, enquanto esta se deforma em, aproximadamente, uma casca esférica. O ensaio de expansão hidrostática é apresentado de forma detalhada e inserido no contexto de processos de conformação. Uma modelagem analítica do ensaio é brevemente explicada antes da apresentação do projeto do dispositivo: dimensionamento, desenhos de detalhe de todas as peças, desenho de conjunto bem como as fotos das peças confeccionadas nos laboratórios da EPUSP. Na seção Instrumentação diversas alternativas são apresentadas para a bomba e para os aparelhos de medição (pressão, deslocamento e sistema de aquisição). Por fim o planejamento experimental para os ensaios de conformação hidrostática de chapas metálicas é apresentado.

Palavras chave: conformação, “bulge test”, expansão hidrostática, plasticidade, instrumentação.

1. Introdução

1.1. Contexto Global

O setor automotivo vem sendo obrigado a rever seus métodos e suas tecnologias de produção para satisfazer às novas normas ambientais, determinadas pelo acordo de Kyoto sobre a redução da emissão de gases de efeito estufa. Reduzir o consumo de combustível é a uma maneira eficaz de se reduzir os gases poluentes, portanto a diminuição da massa do veículo torna-se então o objetivo principal deste setor, pois se estima que reduzindo a massa do veículo de 25% tem-se uma redução de 15% no consumo de combustível. (Ben-Tahar, 2005)

A necessidade de diminuição do peso foi traduzida pela introdução de novas estruturas mais leves. Assim, ligas de alumínio e novas nuances de aço com alto limite de elasticidade vêm sendo desenvolvidas, estas oferecem uma melhor relação resistência / massa específica que os aços convencionais. Entretanto a redução de peso não se limita somente ao desenvolvimento de novos materiais mais leves, mas também à redução do número de peças elementares. Pois reduzindo a quantidade de peças reduz-se também a quantidade de matéria-prima utilizada assim como a de material de cordão de solda. (Ben-Tahar, 2005)

Entretanto a produção de geometrias complexas em somente uma peça não é facilmente realizável através do processo convencional de embutimento. Por esta razão o processo de hidroconformação foi introduzido como uma tecnologia alternativa. Sob o nome de processo de hidroconformação são associadas diversas técnicas, mas todas têm como base o mesmo princípio, a ação de um líquido sob pressão para a deformação de uma peça primária, que pode ser um tubo ou uma chapa. (Ben-Tahar, 2005)

1.2. Diferentes processos de hidroconformação

1.2.1. Hidroconformação de tubos

A hidroconformação de tubos foi o primeiro processo de hidroconformação a ser desenvolvido e utilizado em diversas aplicações industriais. Esta técnica de conformação utiliza a força de um fluido sob pressão que ao ser injetado no interior do tubo o deforma plasticamente por expansão, como mostra a Fig. (1). Um esforço de compressão é aplicado às duas extremidades do tubo permitindo assim um “aumento” de matéria na zona deformada. Este “aumento” tem o efeito de compensar a redução da parede do tubo e de melhorar sua capacidade de se deformar. (Gelin, 2001)

Esta técnica é amplamente utilizada para peças de automóveis, dentre elas temos os coletores de escapamento, o suporte do motor, etc.

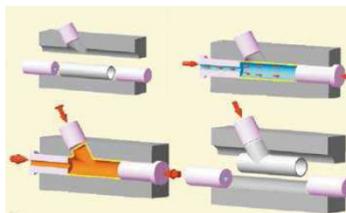


Figura 1. Princípio do processo de hidroconformação de tubos.

1.2.2. Hidroconformação de chapas

O processo consiste na aplicação de um fluido sob pressão sobre uma chapa fixa a uma matriz. Em relação ao processo de embutimento, o líquido faz o papel de punção, vide Fig. (2), ou de matriz, vide Fig (3). Assim, no primeiro caso, a chapa é deformada contra uma matriz que dá a forma final. (Siegert, 2000). Já no segundo caso a chapa é deformada pela ação conjugada de um punção em movimento e o líquido pressurizado. Ao final do processo, a chapa tem a forma do punção. (Thiruvarduchelvan, 2003)

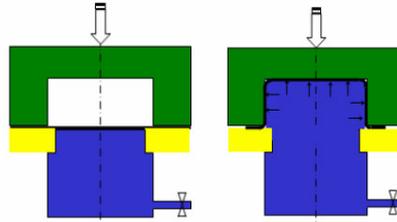


Figura 2. Princípio de conformação de uma chapa.

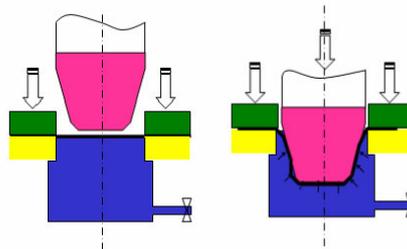


Figura 3. Princípio de conformação hidromecânica.

1.3. Vantagens e desvantagens do processo de hidroconformação

De uma maneira geral, a hidroconformação oferece inúmeras vantagens: (Kang, 2004 e Walia, 1999)

- Diminuição do número de peças e, portanto um ganho em tempo de montagem e de soldagem. A título de exemplo, o coletor de escapamento constitui uma das principais peças manufaturadas pelo processo de hidroconformação de tubos. Assim (Schuler-Hydroforming, 2000) estima em 50% a redução do número de peças, 25% do custo de produção, 25% em ganho de peso e 60% em custo de ferramental.
- A conformação de peças complexas tem boa reprodutibilidade e estabilidade dimensional.
- A repartição de espessuras é mais homogênea, pois não há contato com o punção.
- Maior rigidez das peças finais, resultado da redução do número de peças e cordões de solda. A título de exemplo, a integração de certas peças hidroconformadas na estrutura do veículo *Freelander (Land Rover)* revelou uma melhora de 25% na resistência total da estrutura à torção.
- Redução dos custos de ferramental, pois só há necessidade de uma matriz fêmea. Igualmente, diversas espessuras de chapa podem ser utilizadas pelo mesmo ferramental, com apenas alguns ajustes.

Entretanto o processo de hidroconformação apresenta certas limitações:

- Na hidroconformação, a pressão é uniformemente repartida sobre a superfície da peça. Tanto as pressões como as superfícies são elevadas, conseqüentemente os esforços também são altos e, portanto as prensas atingem dimensões consideráveis (até 100.000 KN). O investimento inicial em tais instalações é alto e, portanto limita consideravelmente o uso dessa tecnologia.
- As três fases (preenchimento, conformação e calibragem) que constituem o processo de hidroconformação são relativamente lentas. O ciclo (30s a 90s) desta tecnologia a exclui da produção em grande escala.

1.4. Objetivos

O objetivo do presente projeto de pesquisa é investigar o comportamento dos parâmetros do processo de conformação hidrostática para que se possa futuramente ter um melhor controle sobre o produto final, buscando, assim, a otimização do processo como um todo. Para isso, torna-se necessário o projeto e a construção de um dispositivo que possibilite fazer ensaios de expansão hidrostática monitorando por sensoriamento seus parâmetros e resultados.

2. Ensaio de expansão hidrostática de chapas (“bulge test”)

2.1. Introdução

Nos últimos anos, o ensaio de expansão hidrostática vem reconquistando o interesse dos pesquisadores, devido à industrialização do processo de hidroconformação.

2.2. Descrição dos processos de conformação

A conformação de chapas e/ou tubos metálicos consiste em mudar a forma destes, sem alterar seu volume e sua massa, através da deformação plástica. O escopo da conformação é muito amplo, pois possibilita a obtenção de uma vasta gama de peças, desde formas simples e pequenas até estruturas grandes e muito complexas. (Taylor)

Os mecanismos básicos da conformação são: estiramento, estampagem ou embutimento e dobramento e mesmo operações de conformação complexas consistem numa combinação ou seqüência destes mecanismos básicos. (Taylor)

O estiramento é causado por tensões de tração, que excedem a tensão de escoamento, aplicadas perpendicularmente ao plano da superfície a ser conformada provocando uma deformação em dois sentidos (biaxial). Quando as forças perpendiculares são iguais ocorre o chamado estiramento biaxial balanceado, e nesta operação é obtido o maior nível de deformação. O estiramento em estado plano de deformação é obtido quando ocorre um alongamento em uma direção e nenhum na direção perpendicular. Esta condição é resultado, por exemplo, do estiramento de uma chapa larga na direção de seu comprimento, como no caso das paredes de uma peça estampada, vide Fig. (4). Neste caso, a deformação perpendicular à direção onde ocorre o estiramento é dificultada pelo material adjacente e é nesta condição que os materiais falham com menor valor de deformação. (Taylor)

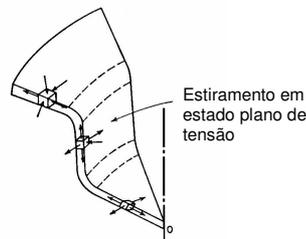


Figura 4. Estiramento em estado plano de tensão.

No embutimento ou estampagem há alongamento numa direção e redução na perpendicular. O exemplo mais simples desta operação é a estampagem de um copo cilíndrico de fundo plano. Para isto um “blank” de formato circular é mantido entre dois anéis planos e puncionado no centro por um punção cilíndrico de fundo plano, este proporciona o movimento do “blank” para formar a parede do copo, vide Fig. (5). Dessa forma o material é tracionado radialmente e comprimido circunferencialmente à medida que seu diâmetro diminui. (Taylor)



Figura 5. Peça estampada.

O dobramento ocorre em quase todos os processos de conformação e é o tipo de deformação mais comum. Neste caso a deformação é localizada e a distribuição desta ao longo da peça é impedida, por isto o dobramento ao redor de um pequeno raio nos estágios iniciais de um processo de conformação pode levar à ruptura localizada da peça. O processo de dobramento e desdobramento, que também é comum entre os processos de conformação, deforma a frio o material, especificamente na superfície o que ocasiona a redução da conformabilidade daquela região. (Taylor)

Como pode ser observado na Fig. (6), o processo de conformação de chapas envolve uma combinação ou seqüência de mecanismos básicos para a maioria das peças produzidas, sendo elas pequenas ou grandes, de geometria simples ou complexa.

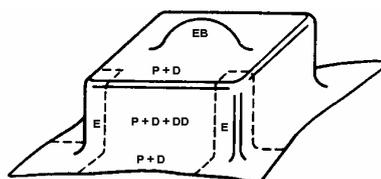


Figura 6. Peça deformada e seus diferentes tipos de deformação por região: D, dobramento; EB, estiramento biaxial; E, embutimento; P, estiramento em estado plano de deformação; DD, desdobramento. (Taylor)

Os processos de conformação envolvem diversas variáveis e a escolha destas e das relações entre si determina a qualidade do processo. Alguns parâmetros importantes são: a temperatura de trabalho, a velocidade (taxa) de deformação e a lubrificação. Alguns fatores que influenciam também o processo são: a ductilidade do material, a estrutura metalúrgica do material e o atrito na interface da ferramenta e da peça. Uma das conseqüências da combinação inadequada entre os fatores e parâmetros acima citados é a presença de tensões residuais na peça após o término do processo. (Taylor)

Dentre os principais processos de conformação, vide Fig. (7), podemos citar: dobramento, embutimento ou estampagem profunda, estiramento, cisalhamento, mandrilamento (tubos), forjamento, extrusão, laminação, trefilação e a hidroconformação. (Taylor)

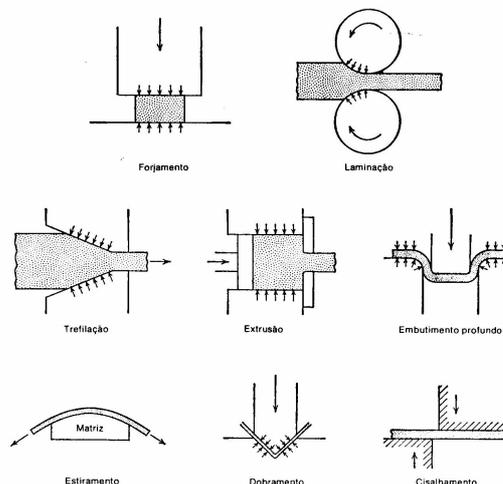


Figura 7. Principais operações de conformação.

2.3. Teste de conformação hidrostática de chapas metálicas (“bulge test”)

O teste de conformação de chapas metálicas por expansão hidráulica é a base para o processo de hidroconformação. Tendo isto em vista, é necessário estudar a fundo este teste e os parâmetros que influenciam o resultado final deste, para, cada vez mais, otimizar processos de hidroconformação. Além disso, o teste tem as seguintes aplicações: (Taylor)

- Caracterização intrínseca do material sob estado de estiramento biaxial, que é um estado de tensão muito comum nos processos de estampagem;
- Testar níveis de tensões muito mais elevados do que aqueles alcançados em testes de tensão uniaxial (em alguns casos até dez vezes maior), particularmente para materiais trabalhados a frio;
- Checar a validade das teorias de plasticidade que tentam prever o comportamento do escoamento de metais em todos os estados de tensão a partir de testes de tensão uniaxial e de deformação plana.

O teste consiste, basicamente, do seguinte procedimento: a borda de uma amostra de chapa metálica é presa, ou fixada, entre anéis circulares ou elípticos, e uma pressão hidráulica é aplicada sobre um lado da amostra para que esta se deforme aproximadamente em forma de uma cúpula, como mostra a Fig. (8). A flange, ou borda, da amostra é impedida de escapar devido a um esticador, ou quebra-rugas, que consiste numa protuberância de raio muito pequeno em um anel-base e do entalhe correspondente no outro. (Taylor)

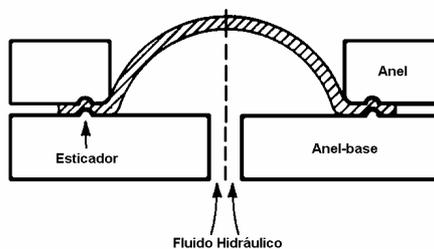


Figura 8. Teste de conformação de chapas metálicas por pressão hidrostática.

Cada matriz tem diferentes dimensões, podendo ser circunferenciais e elípticas. No caso da matriz elíptica considera-se a a cota do diâmetro maior da elipse e b a cota do diâmetro menor. Neste trabalho as seguintes relações a/b serão utilizadas: $a/b = 1,0; 0,8; 0,6$ e $0,45$. Ao utilizar a/b de diferentes magnitudes, diferentes seqüências ou históricos de deformação são obtidos, indo de estiramento biaxial balanceado para $a/b = 1,0$, quando a cúpula aproxima-se muito

de uma capa esférica, até estiramento biaxial plano para relação $a/b = 0,45$. As relações a/b intermediárias resultarão em composições dos estados acima mencionados.

Os estados de tensão e deformação nesta região podem ser determinados com o raio de curvatura da capa esférica, a altura do pólo e a pressão do fluido. (Taylor)

2.4. Estudo do ensaio de conformação hidrostática: modelagem analítica

O ensaio de conformação hidrostática é analisado neste tema, adotando-se o critério de plasticidade anisotrópico de Hill48 para a descrição do comportamento das chapas. (Hill, 1950)

a. Critério de Hill48 em tensões planas

Antes de abordar o tratamento do ensaio, é necessário lembrar a expressão do critério de Hill48 (Hill, 1950) com a hipótese de tensões planas e supondo que os eixos principais de tensões coincidam com o sistema ortotrópico. A tensão equivalente é definida, nos eixos principais, como:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{r_{90}(1+r_0) - 2r_0r_{90}\Omega + r_0(1+r_{90})\Omega^2}}{\sqrt{r_{90}(1+r_0)}} \sigma_1 \quad (1)$$

onde r_0 e r_{90} são os coeficientes de Lankford, identificados pelas orientações definidas a 0° e 90° em relação à direção de laminação, com

$$\Omega = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (2)$$

Para uma lei de escoamento associada, a deformação equivalente é dada por:

$$d\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{1+r_0} \sqrt{r_0(1+r_{90}) + 2r_0r_{90}\beta + r_{90}(1+r_0)\beta^2}}{\sqrt{r_0 + r_0r_{90} + r_0^2}} d\epsilon_1 \quad (3)$$

com

$$\beta = \frac{d\epsilon_2^p}{d\epsilon_1^p} \quad (4)$$

onde o índice p indica deformação plástica.

Aliás, é possível demonstrar, utilizando a Eq. (4) e a lei da normalidade, que a relação das tensões é ligada à relação de deformações pela seguinte relação:

$$\beta = \frac{r_0(1+r_{90})\Omega - r_0r_{90}}{r_{90}(1+r_0) - r_0r_{90}\Omega} \quad (5)$$

b. Equação do equilíbrio

Daqui em diante, o sistema ortotrópico do material será utilizado para a representação das tensões e deformações. Neste sistema, o estado de tensão no pólo de uma chapa deformada é definido pelo seguinte tensor de tensões:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Como as tensões principais estão confundidas com os eixos de ortotropia, a condição de coaxialidade é verificada. O tensor de deformações também é diagonal no sistema de ortotropia e é dado por:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

A equação de equilíbrio ou equação de Pascal é dada por:

$$\frac{\sigma_1}{R_\theta} + \frac{\sigma_2}{R_\phi} = \frac{P}{e} \quad (8)$$

onde σ_1, σ_2 são as tensões principais (confundidas com os eixos do material), R_θ, R_ϕ são os raios de curvatura respectivamente segundo as duas direções principais, P é a pressão hidrostática e e a espessura do pólo da chapa, como mostra a Fig. (8).

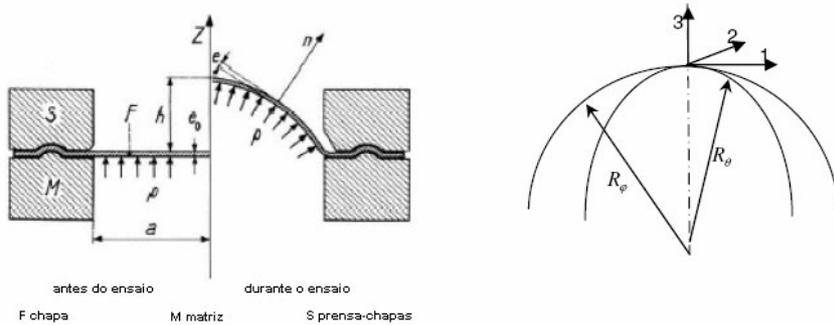


Figura 8. Parâmetros do ensaio de expansão hidrostática.

Introduzindo a relação entre as tensões Ω e supondo que $R_\theta = R_\phi = \rho$, a equação do equilíbrio se reduz a:

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot \rho}{(1 + \Omega) \cdot e} \quad (9)$$

Supondo que a geometria da chapa deformada tem a forma esférica, o raio de curvatura ρ pode ser deduzido a partir da altura do pólo h em um determinado raio a através da equação do esferômetro:

$$\rho = \frac{a^2 + h^2}{2h} \quad (10)$$

Pode-se demonstrar ainda que a deformação principal é definida por:

$$\varepsilon_1 = \ln \left(1 + \frac{h^2}{a^2} \right) \quad (11)$$

A este ponto, a tensão e a deformação principal em função de variáveis que podem ser obtidas (h, a, e, P). Para estabelecer uma relação direta entre os esforços e a deformação é necessário determinar da relação de tensões Ω .

Para determiná-la, primeiramente supõe-se um estado de anisotropia normal, o que reduz o número de parâmetros de anisotropia a somente um parâmetro \bar{r} ($\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4$). Neste caso, o comportamento é isotrópico no plano da chapa, e portanto tem-se um estado de tensão e deformação equi-biaxial ($\beta = \Omega = 1$). A tensão e a deformação equivalente, Eq. (1) e Eq. (2) respectivamente, são dadas por:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{(1 + \bar{r})}} \cdot \sigma_1 \quad (12)$$

$$d\bar{\varepsilon} = \sqrt{2(1 + \bar{r})} \cdot d\varepsilon_1 \quad (13)$$

A espessura do pólo é definida a partir da espessura inicial e_0 , com a hipótese de incompressibilidade plástica, é dada por:

$$e = e_0 \cdot \exp\left(2 \cdot \ln\left(1 + \frac{h^2}{a^2}\right)\right) \quad (14)$$

3. Materiais e métodos

3.1. Planejamento experimental

De acordo com o equacionamento na seção 2.4 os parâmetros necessários para a determinação da tensão e da deformação no pólo, são a espessura da chapa, o raio de curvatura, que é dado pela altura do pólo, e a pressão do fluido. O fluxograma abaixo, vide Fig. (9), determina quais grandezas devem ser medidas para se obter a tensão e a deformação efetivas. Tendo estas em vista, o projeto do dispositivo foi iniciado tendo como base trabalhos realizados no período de 2003-2004 pela autora como bolsista de Iniciação Científica FAPESP (Processo nº 03/08577-3) sob orientação do Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha.

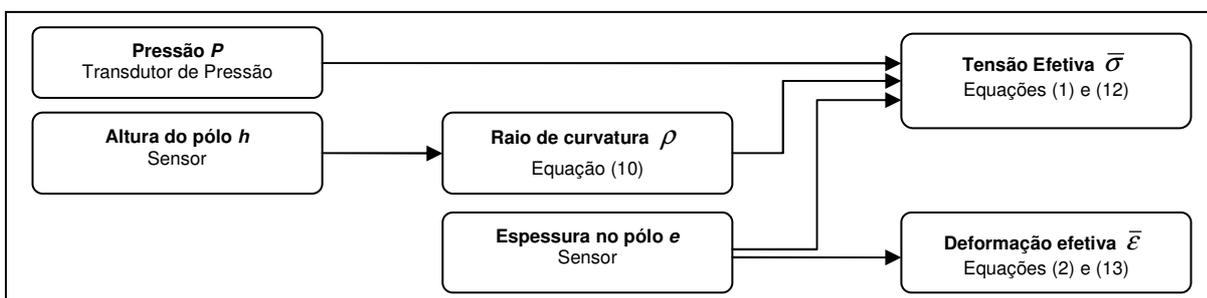


Figura 9. Determinação da tensão e da deformação no “bulge test”.

3.2. Projeto do dispositivo

3.2.1. Grandezas medidas

Como explicitado na Fig. (9), as grandezas a serem obtidas neste ensaio são a tensão e a deformação efetivas, estas podem ser obtidas utilizando medições feitas durante o ensaio e as equações da seção 2.4.

3.2.2. Parâmetros do ensaio

Os parâmetros do ensaio são a pressão, que será constantemente monitorada ao longo do ensaio através de um transdutor de pressão, e a forma da matriz, como já explicitado na seção 2.3 quando a forma desta varia as condições do ensaio são modificadas. Outros parâmetros como o material do corpo de prova, o fluido utilizado e a velocidade de deformação também podem ser modificados.

3.2.3. Peças confeccionadas

O dispositivo é composto de diversas peças e todas estas serão confeccionadas nos laboratórios da EPUSP.

- Base: a função desta peça é suportar a matriz e receber o fluido sob pressão que será responsável pela deformação da amostra. A base tem a forma cilíndrica, com uma cavidade cilíndrica no centro por onde o fluido passa e entra em contato com a chapa sobre o anel-inferior da matriz. O sistema hidráulico é ligado à base através de um orifício, cuja função é receber o fluido sob pressão.
- Matriz: a matriz deste dispositivo, anel-inferior cilíndrico cuja relação a/b é variável, é a peça sobre a qual a amostra é posicionada durante o ensaio.
- Prensa-chapas: anel-superior cilíndrico cuja relação a/b é variável, é a peça que exerce a força de fechamento sobre a chapa para garantir a fixação da chapa durante o ensaio. Para melhorar as condições de fixação da chapa durante os ensaios é previsto um “quebra-rugas” no prensa-chapas e na matriz. O “quebra-rugas” é uma saliência no prensa-chapas e uma cavidade na matriz que diminuem as rugas que se formam durante o ensaio.
- Colunas: as quatro colunas previstas no dispositivo tem a função de transmitir os esforços, que são aplicados pela prensa ao suporte, ao prensa-chapas.
- Suporte: o suporte tem a função de transmitir os esforços da prensa até o prensa-chapas como também a função de suporte para o sensor que realiza as medições durante o ensaio.

Os materiais escolhidos para confecção do dispositivo para o ensaio de conformação hidrostática foram os aços ABNT 1020 e 1045, devido ao baixo custo destes e à grande disponibilidade no mercado. Para a confecção do dispositivo é necessário que a matéria-prima já esteja em suas formas geométricas aproximadas. Na Tabela (1) estão explicitadas as quantidades, as formas geométricas, os materiais necessários para a confecção, bem como sua finalidade, nesta tabela também estão os elementos de fixação utilizados.

Tabela 1. Materiais utilizados para a confecção do dispositivo.

<i>Forma Geométrica</i>	<i>Dimensões (mm)</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Material</i>	<i>Finalidade</i>
Tarugo Cilíndrico	Ø 300 X 200	1	Aço ABNT 1045	Base e Anéis
Chapa Circular	Ø 270 X 22	1	Aço ABNT 1045	Suporte
Barra	Ø 25,4 X 850	1	Aço ABNT 1020	Colunas
Parafuso Allen	M 6 X 0,75	12	-	Fixação

A Figura (10) ilustra o dispositivo e ao lado os conjuntos de anéis (matriz + prensa-chapas) que podem ser utilizados para mudar as condições dos ensaios. Entretanto somente dois conjuntos de anéis foram construídos até este presente momento, o par circular e um par elíptico, uma vez que não são necessários todos os pares de anéis para que o funcionamento do dispositivo seja concretizado, que há restrição de verbas para aquisição de materiais e que a confecção do par de anéis elípticos é um pouco mais complexa que a dos outros componentes do dispositivo, pois o quebra-rugas elíptico demanda uma ferramenta de corte específica e esta precisa ser construída para que a confecção deste par de anéis seja finalizada. A seguir, vide Fig. (11), é apresentado o dispositivo construído nos laboratórios da EPUSP.

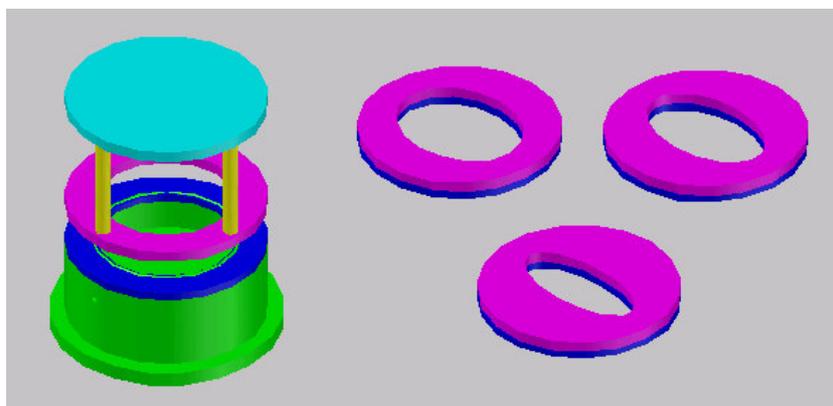


Figura 10. Desenho em Autocad 3D do ferramental projetado para ensaio de conformação hidrostática.



Figura 11. Dispositivo para ensaio de conformação hidrostática fabricado nos laboratórios da EPUSP.

3.2.4. Instrumentação

O ferramental construído para fins acadêmicos prevê o fácil posicionamento de sensores de pressão e deslocamento e apresenta boa rigidez. A fixação da chapa (corpo de prova) é feita através de uma prensa ligada ao suporte, esta está

disponível na oficina da EPUSP. A prensa hidráulica da marca Máquinas Piratininga tem capacidade de 300KN, suficiente para a força de fechamento necessária durante o ensaio, aproximadamente 6 KN de acordo com a Tab. (2).

A bomba hidráulica será escolhida com base na pressão necessária para a deformação das chapas. Em um trabalho recente realizado no Politécnico di Milano, ensaios foram realizados utilizando chapas de aço S355MC, cuja tensão e escoamento é 355MPa e a tensão de ruptura entre 430 e 550 MPa, de 2mm de espessura. Trata-se de um aço de alta resistência com baixo teor de inclusões. A parte experimental do trabalho consistia na realização de ensaios de conformação hidrostática, com uma matriz circular e com uma matriz elíptica. Os resultados dos ensaios são apresentados na Tab. (2). Portanto pode-se constatar que a pressão necessária para ruptura de chapas de aço não ultrapassa 300 bar. (Rossi, 2005)

Tabela 2. Dados e ensaios dos experimentos realizados no Politécnico di Milano. (Rossi, 2005)

<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tipo de Matriz</i>	<i>Dimensões do furo (mm)</i>	<i>Dimensões da chapa (mm)</i>	<i>Força de fechamento (kN)</i>	<i>Pressão de ruptura (bar)</i>
2	Circular	Ø 200	400X400	4.257	156
2	Elíptica	200X70	300X300	5.473	290

O fabricante escolhido foi a Kärcher, e, de acordo com o catálogo, escolheu-se a bomba hidráulica modelo HD 2/150, cuja pressão máxima é 1500 bar. Entretanto esta bomba não está disponível no mercado nacional, o que leva a uma segunda opção da Kärcher, a bomba “HD 10/25 MAXI – A maior pressão do segmento”, cuja pressão máxima é 250 bar. O orçamento desta bomba foi feito Revenda Autorizada Kärcher – Multicoisas e o preço desta é R\$ 7.600,00. Entretanto esta bomba não é a mais adequada para os ensaios, pois a pressão é muito baixa (250 bar) e isso limitaria muito o escopo do projeto, limitando os ensaios somente a chapas de alumínio. (Kärcher, 2007)

Durante os ensaios três sinais devem ser monitorados para a determinação da influência de cada um destes no processo: a pressão interna, o deslocamento do pólo da chapa e a temperatura (este parâmetro não é indispensável e, portanto, não será abordado neste projeto).

Para medir o deslocamento, um transdutor de deslocamento também será necessário, este deverá ter um curso de 40mm aproximadamente. O transdutor de deslocamento WA tem curso de 50mm e custa em torno de R\$ 2.500,00 (orçamento deste foi feito pela HBM do Brasil em setembro de 2007).

Para a obtenção da pressão durante o ensaio foi escolhido o transdutor de pressão absoluta P8AP de 500 bar, que custa R\$ 1.250,00 (orçamento também foi feito pela HBM do Brasil em setembro de 2007).

Estes sensores de deslocamento e de pressão são adequados às necessidades do projeto, entretanto devido à limitação de verbas estes não serão necessariamente os sensores utilizados no dispositivo, pois existe a possibilidade de reutilização de sensores que já foram usados em outros trabalhos sobre hidroconformação do mesmo grupo de pesquisa.

Um sistema de aquisição é importante para podermos controlar o processo e registrar as curvas de pressão e deslocamento.

A primeira alternativa consiste em um sistema de aquisição com sensores HBM (descritos acima). Trata-se do sistema universal de medição de dados simultâneo, SPIDER 8, possui oito canais de alta taxa de amostragem. Utilizando este sistema a pressão e a temperatura podem ser monitoradas simultaneamente durante o ensaio. O software de aquisição CatmanEasy permite o tratamento dos dados e o traçado de gráficos. Entretanto este sistema apresenta uma inconveniência, pois o fato de existir contato entre o sensor e a chapa pode gerar instabilidades e influências na medição, principalmente em chapas de baixa espessura. Para solucionar este problema uma alternativa seria utilizar um sensor de não contato (ultra-som e laser). O orçamento deste sistema foi feito pela HBM do Brasil Ltda, SPIDER8 custa em torno R\$ 14.500,00 e o software CATMAN-EASY em torno de R\$ 2.000,00.

Uma outra proposta é a utilização do sistema de análise óptica de deformações 3D: ARAMIS do fabricante GOM. Este sistema utiliza duas (ou três) câmeras posicionadas de tal forma a captar a imagem de deslocamento das chapas. O software ARAMIS se encarrega de gerar a imagem e as curvas de deslocamento/deformação. Este software é baseado no método do teste de Nakazima, que usa um método de medida de grade. Em geral uma grade circular é gravada eletroquimicamente na superfície da chapa e é medida após a conformação. Este método envolve alto processamento (e, portanto, tempos de aquisição altos) e gera baixa resolução local. Portanto, um sistema de medição óptico foi desenvolvido, sendo que este sistema gera resultados bastante rapidamente e com pressão significativamente maior na determinação dos Diagramas Limite de Conformação. Este sistema não apresenta a inconveniência do contato entre sensores e o corpo de prova, pois utiliza câmeras para a aquisição das imagens, entretanto o custo é muito elevado em torno de US\$ 60.000,00, o que limita sua aplicação.

Outra alternativa do mesmo fabricante é o sistema ARGUS que mede mudanças de forma em chapas metálicas, tubos ou em qualquer outro componente manufaturado através de um processo de deformação de alta pressão. O procedimento de medição é parecido com o procedimento do ARAMIS (câmeras CCD de alta resolução), entretanto os resultados obtidos através do ARGUS são mais adaptados às necessidades deste projeto, pois podemos obter a topologia, tensões menores e maiores, diminuição da espessura do corpo de prova bem como Diagramas Limite de Conformação. O preço deste sistema é aproximadamente o mesmo que o do sistema ARAMIS.

O esquema simplificado do sistema hidráulico a ser montado é apresentado na Fig. (12). (Linsingen, 2001)

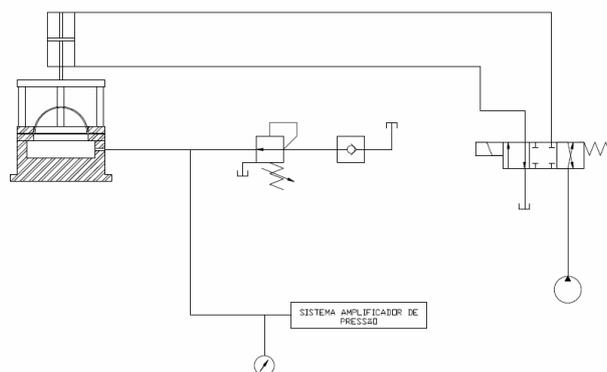


Figura 12. Esquema do sistema hidráulico para dispositivo de conformação hidrostática.

4. Referências

- BEN-TAHAR, M., 2005, “Contribution à l’étude et la simulation du procédé d’hydroformage”, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, Paris, França.
- EASTERBROOK, K. & GRIEVE, J., 1985, “A device for rapid determination of equivalent stress-equivalent strain curve for sheet metals under balanced biaxial stress conditions”, Journal of Mechanical Working Technology. Inglaterra: Elsevier Science Publishers, 11, p. 229 – 236.
- GELIN, J. C. & LABERGÈRE, C., 2001, “Modeling, optimization and optimal control for hydroforming process”, Proceedings of the 4th International ESAFORM Conference on Material Forming, V. 1, p. 377 – 380.
- HILL, R., “A theory of plastic bulging of metal diaphragm by lateral pressure”, Phil Mag. 7, 1950, p. 1133 – 1142.
- KANG, B. S.; SON, B. M. & KIM, J., 2004, “A comparative study of stamping and hydroforming processes for automobile fuel tank using FEM”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, p. 87 – 94.
- Kärcher Commercial Products – High-pressure cleaners, disponível em http://www.karcher.com/int/Products/Commercial/Highpressure_cleaners/Cold_water_highpressure_cleaners/Special_units/13311040.htm, Acesso em: 4 de setembro de 2007.
- LINSINGEN, I., “Fundamentos de sistemas hidráulicos”, Florianópolis: Editora da UFSC, 2001, p.387 – 396.
- ROSSI, M. & RUGGIERO, A., “Previsione della rottura duttile nei processi di idroformatura di tubi e lameri utilizzando un modello di danno non lineare”, XXXIV Convegno Nazionale – Politecnico di Milano, 14-17 Settembre 2005.
- SCHULER – HYDROFORMING, 1/2000 – 2/2000, “The Magazine for Metalforming Inform”.
- SIEGERT, K. & HAUSSERMANN, 2000, M., “Recent developments in hydroforming technology”, Journal of Material Processing Technology 98 (2), p. 251 – 258.
- TAYLOR, B., “Sheet formability testing”, USA: ASM – Metals Handbook, 9th Edition, v. 8, p. 548 – 551/558 – 559.
- THIRUVARUDCHELVAN, S. & TRAVIS, F. W., 2003, “Hydraulic-pressure-enhanced cup-drawing processes”, Journal of Material Processing Technology 140 (1-3), p. 117 – 123.
- WALIA, S.; GOWLAND, S.; HEMMINGS, J.; BECKETT, M. & WAKELIN, P., 1999, “The engineering of a body structure with hydroformed component”, Society of Automotive Engineers, 1999-01-3181.

5. Direitos autorais

A autora é a única responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Hydrostatic sheet forming device

Branca Ballot de Miranda

branca_miranda@hotmail.com

Abstract. The present work aims at studying the metal sheet forming through the bulge test to improve the hydroforming process, which allows the manufacturing of very complex geometries, using tubes or sheets, with the reduction of components and joints. This process enables the optimization of the forming industry processes and the minimization of its costs, the knowledge of their parameters becoming very important. The methodology adopted in the experiments involves the constant control of pressure, height and thickness of the metal sheet pole, while it is shaped into, approximately, a spherical form. The bulge test is presented in details and put into the context of manufacturing processes. The analytical modelling of the test is briefly explained before the presentation of the device project: the dimensioning, the detailed drawings of all parts, the assembly drawing as well as the pictures of all parts manufactured at EPUSP. In the Instrumentation section, many alternatives are presented for the hydraulic bomb and for the measurement instruments (pressure, displacement and acquisition system). Finally the experimental planning for the metal sheet bulge test is presented.

Keywords: forming, bulge test, hydrostatic expansion, plasticity, instrumentation.