

HUGO ISSAO TERAZAKI

7,5
BB

**CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS
POR EXPANSÃO HIDRÁULICA (BULGE TEST)**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia Mecânica.

SÃO PAULO
2002

HUGO ISSAO TERAZAKI

**CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS
POR EXPANSÃO HIDRÁULICA (BULGE TEST)**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica – Processos de Fabricação

Orientador:
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha - PMR

SÃO PAULO
2002

Resumo

O estudo de conformação de chapas metálicas tem grande importância para promover a melhoria do processo de fabricação em estamparias, no que se refere à otimização do tempo de fabricação e uso de material.

Este trabalho aborda os diversos tipos de ensaios existentes e concentra o foco no dispositivo de ensaio de expansão hidráulica (bulge test), descrevendo sua construção, método de preparação das chapas a serem ensaiadas, método de realização do ensaio e, por fim, a manipulação dos resultados.

Ainda com relação aos resultados, estes são essenciais para o levantamento das curvas-limites de conformação, que de fato são utilizadas na promoção de melhorias anteriormente citadas. Além disso, os resultados experimentais têm aplicação mais importante como fonte de comparação com simulações numéricas, realizadas com auxílio de programa de computador específico para tanto.

É possível, ainda, visualizar foto e desenhos de fabricação referentes ao protótipo desenvolvido e construído com o intuito de realizar o ensaio proposto.

Palavras-chave: expansão hidráulica, ensaios de estampabilidade, anisotropia, curvas limite de conformação.

Abstract

Metal sheet formability study is an important tool to improve the process at press shop. This tool could be used to rationalize process time and material use.

This report shows many types of formability essays. The focus is biaxial strain sheet metal forming equipment. Typical construction, sheet metal preparing method, essay method and results compilation were described.

Experimental results are very important, because they are used to prepare forming-limit diagrams; in fact, those diagrams are used to improve process at press shop, as mentioned previously. By the way, experimental results have application as comparison data with numerical simulation (using specific software for it).

It is possible to view in this report prototype picture and equipment drawing, too.

Key words: bulge test, formability essays, anisotropy, forming limit diagrams.

1. Introdução.....	2
1.1. Objetivo.....	2
1.2. Escopo do trabalho	3
2. Ensaios de estampabilidade de chapas metálicas	4
2.1. Ensaio de tração[2].....	4
2.2. Testes de Ductilidade ou Anisotropia.....	7
2.2.1. Teste de ensaio de tração biaxial por expansão.....	7
2.2.2. Testes de estiramento com punção.....	7
2.3. Testes de Estampagem	11
2.3.1. Ensaio de Swift	11
2.3.2. Teste Engelhardt.....	12
2.3.3. Teste de Fukui	14
2.3.4. Teste de estampagem - estiramento	14
2.3.5. Teste de estiramento de tiras	15
2.3.6. Teste de Yoshida	16
2.3.7. Testes de expansão de furo de Siebel e Pomp	17
2.3.7. Teste de estampabilidade Modul-r (sic).....	18
2.3.8. Testes de Queda Livre	20
2.3.9. Teste de Estiramento de Marciniak e Duncan et al.....	24
3. Ensaio de Expansão Hidráulica.....	28
3.1. Análise teórica	29
3.1.1. Introdução.....	29
3.1.2. Conformabilidade de uma chapa	30
4. Construção e Execução de Ensaios.....	36
4.1. Procedimento experimental	40
4.1.1. Etapas de preparação do ensaio.....	40
4.1.2. Execução dos ensaios	47
4.2. Interpretação de resultados	48
5. Conclusão	58
6. Motivação para trabalhos futuros	59
7. Referências Bibliográficas.....	60
8. Anexos.....	62

1. Introdução

A análise e acompanhamento do processo de estampagem de chapas tem tido sua importância incrementada à medida que as formas dos produtos estampados vêm ganhando contornos cada vez mais complexos[1]. Tal fenômeno pode ser especialmente observado nas indústrias aeroespacial e automobilística que, além de inovar nas formas, têm buscado a utilização de novos materiais e a racionalização, ou seja, através de exaustivos testes e cálculos, uma estrutura obtida até então com determinada quantidade e espessura de material, passa a ser construída com significativa redução, sem que isso signifique enfraquecimento e/ou queda de qualidade. Estes aprimoramentos do processo de estampagem tornam necessário o desenvolvimento de ferramentas capazes de ensaiar peças estampadas, bem como de produção das mesmas.

1.1. Objetivo

Com este intuito, este trabalho visa desenvolver equipamento com capacidade tanto de ensaiar como eventualmente produzir peças estampadas através de conformação por pressão hidráulica, oferecendo visão geral do equipamento.

O equipamento construído destina-se basicamente à realização de ensaios de conformação por pressão hidráulica em matrizes circular e elíptica de chapas metálicas (aço, alumínio, cobre, latão, entre outros materiais).

Também chamado de ensaio de expansão hidráulica por pressão hidráulica, o equipamento tem construção relativamente simples, como mostram os desenhos – anexos. Sua utilização tem, por objetivo, o estudo completo da deformação de chapas metálicas por tração biaxial.

1.2. Escopo do trabalho

A escolha deste dispositivo é precedida por um breve estudo dos mais diversos tipos de testes de conformação plástica existentes para então ser feita a opção pelo dispositivo e metodologia de ensaio.

Faz-se, a seguir, uma breve apresentação dos testes mais significativos, incluindo os testes importantes para os ensaios de estampabilidade de chapas metálicas.

2. Ensaios de estampabilidade de chapas metálicas

2.1. Ensaio de tração[2]

O teste mais amplamente utilizado para a avaliação de conformação de chapas metálicas é o teste de ruptura por tração. Com um equipamento apropriado, extensometria e um computador, todas as propriedades dos materiais, a serem ensaiados, podem ser determinados e calculados.

Um parâmetro do teste de ruptura por tração é a relação de σ_y por σ_u , onde σ_y é a tensão admissível do material e σ_u , a tensão de ruptura. Esta relação pode ser obtida de forma muito rápida experimentalmente e dá uma idéia do índice de plasticidade do material. Por exemplo, um aço de baixo carbono possui $\frac{\sigma_y}{\sigma_u} \approx 0,4(n-0,3)$ (n é o índice de dureza do material à deformação), enquanto, no estado de maior dureza, $\frac{\sigma_y}{\sigma_u} \rightarrow 1,0(n \rightarrow 0)$. Se o metal em teste obedece $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$, então, se σ_y é definido como $\sigma @ \varepsilon = 0,0002$,

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_u} = \left(\frac{K}{n} \right)^n \text{ logo: } \frac{1}{n} \cdot \ln \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u} \right) = \ln \left(\frac{K}{n} \right) \quad (2.1)$$

Esta relação é válida amplamente para inúmeras chapas de aço, como pode ser visto nas figuras 2.1 e 2.2.

Entretanto, além do teste de ruptura por tração, existem inúmeros outros testes. Estes foram criados porque a teoria de conformação de chapas metálicas está preocupada com as interações entre materiais e ferramentas. Outro motivo é tempo gasto para aquisição de resultados. Em um moinho, medições em tempo real de planicidade, aspereza, valores de r , sendo r a taxa de deformação, mais inspeção de superfície, seguido de um procedimento automático de medição convencional de todas as propriedades mecânicas - conferindo estas medidas - é a prática atualmente adotada, mas nos trabalhos diários, os testes são apenas exigidos quando ocorrem problemas de conformação.

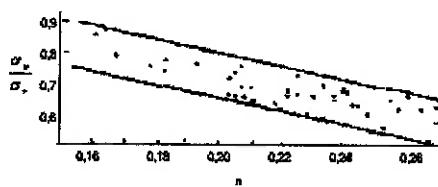


Figura 2.1: Relação experimental entre $\frac{\sigma_y}{\sigma_u}$ e o valor de n [26].

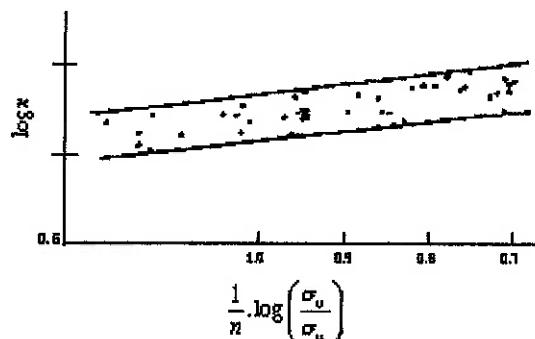


Figura 2.2: Relação entre $\log n$ e uma função de $\frac{\sigma_y}{\sigma_u}$ [26].

Em grandes estamparias, entretanto, o teste de todos os lotes é assumido como pré-requisito para produção e, baseado em experiências anteriores, materiais com propriedades fora do especificado são rejeitados sem exceção.

Em estamparias de pequeno porte, é desejável um teste barato e rápido que possa indicar a origem do problema e mostrar como soluciona-lo. É justo dizer que tal teste não existe.

Em uma tentativa de introduzir alguma ordem e lógica na profusão de testes de simulação, são propostas duas categorias, descritas a seguir:

- (1) Testes que correlacionam ductilidade ou anisotropia medidas em tensão uniaxial;

(2) Testes projetados para simular um fenômeno de estampagem – fricção e/ou lubrificação, flexão simples, rachaduras nas extremidades, torção, topografia de superfície, etc.

2.2. Testes de Ductilidade ou Anisotropia

2.2.1. Teste de ensaio de tração biaxial por expansão

O comportamento biaxial $\sigma - \varepsilon$ é medido com a utilização de um extensômetro biaxial no dispositivo de ensaio de tração biaxial por expansão. Sua utilização principal como teste é obter valores biaxiais de n acima da faixa de tensão possível em tensão uniaxial. Não é requerida nenhuma preparação especial para a amostra.

A descrição detalhada deste ensaio será realizada posteriormente.

2.2.2. Testes de estiramento com punção

Muitos testes existem - provavelmente porque eles são fáceis de inventar. Um dos pioneiros, o teste de Erichsen [2], por exemplo, onde um punção hemisférico de 20 mm é empurrado contra uma chapa de metal engastada até que ocorra a fratura. As desvantagens deste teste são o tamanho, lubrificação, determinação do ponto de ruptura e relação entre o raio

do punção e a espessura da chapa. Com esta configuração, as taxa de tensão muda de $\alpha = 1$ no pólo, para $\alpha = r/(r+1)$ na borda, sobre uma distância circumferencial de apenas 15 mm.

A utilização de um bom lubrificante facilitará a fratura no pólo ou próximo dele (taxa de deformação $\varepsilon_2/\varepsilon_1 \approx 1$), enquanto com um lubrificante ruim a fratura irá de mover em direção à borda ($\varepsilon_2/\varepsilon_1 \approx 0,2$); Conhecidos os limites de deformação, é óbvio que h^* é altamente dependente de lubrificação. Também, o ponto de ruptura deste teste não é exatamente preciso.

Porém, há dois modos nos quais a reprodutibilidade deste teste pode ser melhorada: o uso de um disco de polietileno lubrificado entre a ponta do punção e a chapa, e o uso de um plotter x-y para registrar o ponto de ruptura. A diminuição da dispersão com este sistema de lubrificação é mostrado em figura 3 e a precisão da determinação do ponto de ruptura em uma carga súbita é óbvia.

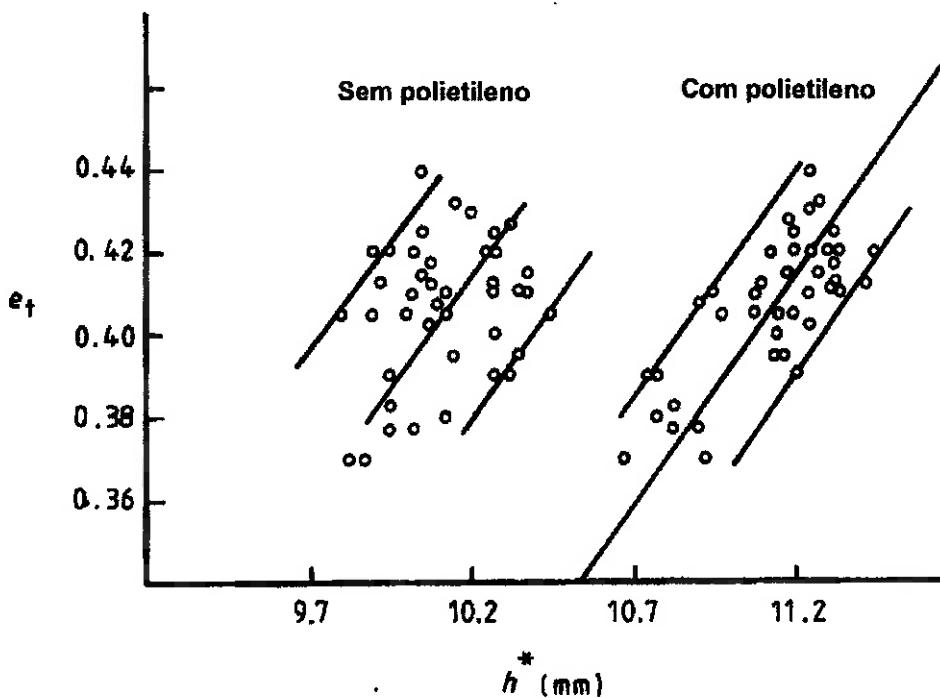


Figura 2.3: Diminuição da dispersão no teste de Erichsen utilizando um disco polietileno lubrificado [26].

Uma sugestão controversa com relação aos testes de *estiramento com punção* foi feita por Hecker [3], que propôs a idéia de nenhuma lubrificação. Sua tese era, “não ajude a chapa a se deformar”, h^* sem lubrificação é uma medida mais confiável da capacidade deformação-dureza dos materiais. Adicionalmente, no teste sem lubrificação que ele especificou, a taxa de deformação na fratura era de 0.1-0.2, que está na faixa mais comum de utilização industrial. Ele apoiou sua idéia com um gráfico de h^* versus n para testes sem lubrificação e o comparou com o gráfico para testes com disco de polietileno lubrificado. A inclinação da curva era maior; assim o teste era mais preciso (figura 2.4). Infelizmente, a dispersão na curva era maior que na anterior e Δn era o mesmo para ambos os sistemas. Deve-se assegurar que

2.3. Testes de Estampagem

2.3.1. Ensaio de Swift

O teste básico de estampagem profunda é atribuído a Swift [4] e é amplamente utilizado. Para determinar a taxa limite de estampagem β^* , blanks circulares cujos diâmetros são incrementados de 1 em 1 mm são estampados até que a falha ocorra. β^* corresponde ao diâmetro do maior blank cuja estampagem foi bem sucedida, dividido pelo diâmetro do punção. Este é um processo muito tedioso que pode ser evitado utilizando um teste com blank duplo. Apenas dois blanks são produzidos, um dos quais irá estampar, enquanto o outro, deliberadamente maior, fraturará. Então β^* pode ser calculado de:

$$\beta^* = \frac{P_f}{P_d} \cdot (\beta_d - 1,2) + 1,2 \quad (2.2)$$

Onde: P_f é a carga de fratura,

P_d é a carga de estampagem e

β_d é a taxa de estampagem (bem sucedida).

A dispersão pode ser reduzida padronizando-se todos os fatores operacionais e, particularmente, usando-se folhas de polietileno lubrificadas sobre ambos os lados do blank, como recomendado por Atkinson [5].

tanto o punção quanto a chapa devem estar limpos (isentos de óleo, graxa e fragmentos metálicos).

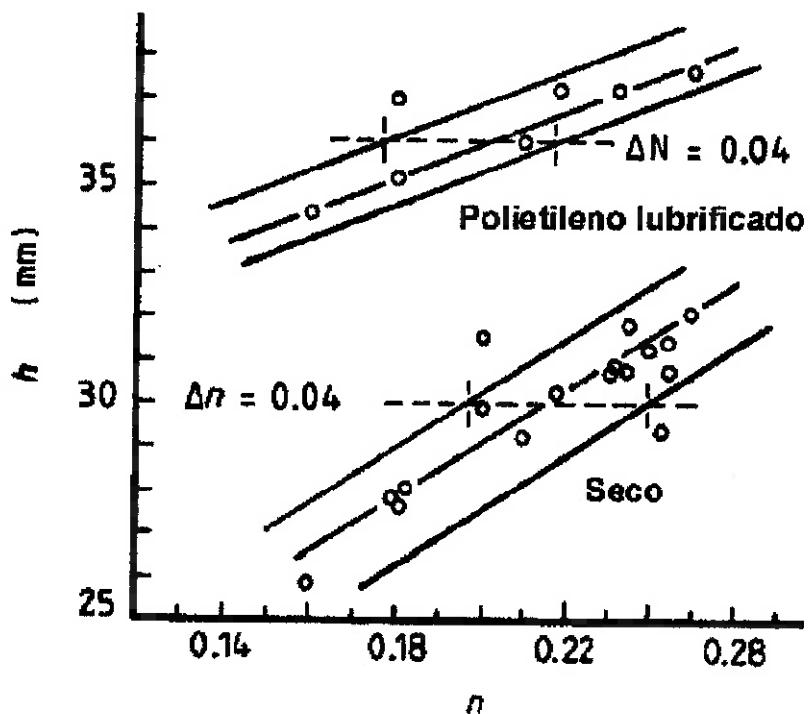


Figura 2.4: A relação entre h^* e n para teste seco versus lubrificado [26].

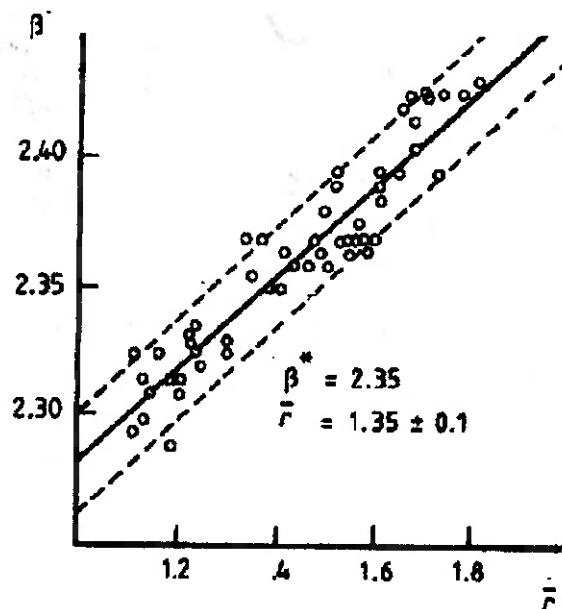


Figura 2.5: \bar{r} versus β^* utilizando lubrificação [26].

2.3.2. Teste Engelhardt

Este teste estudado por Wilson [6] e Atkinson [7] estampa um blank e sua máxima carga de estampagem e então, com um grande incremento na pressão do prensa-chapa para segurar o resto da borda, fratura-se a peça estampada (figura 2.6). Agora, um gráfico de $\frac{P_f}{P_d}$ para um determinado diâmetro original de blank versus valor de \bar{r} , corrigido para qualquer variação de medida, está na figura 2.7.

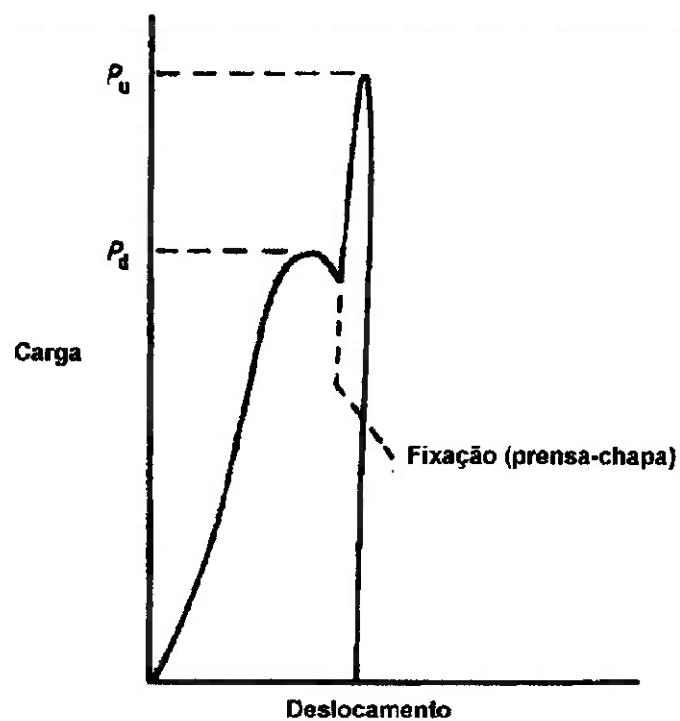


Figura 2.6: Princípio do teste de Engelhardt [26].

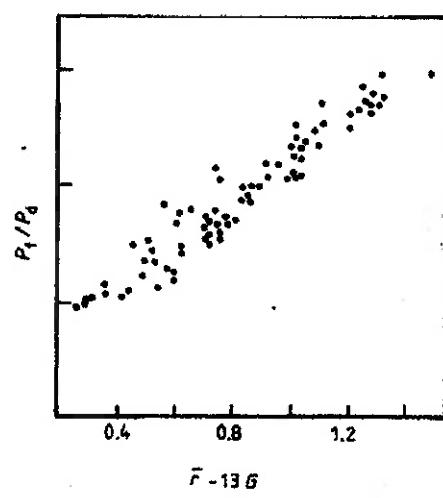


Figura 2.7: Os valores de Engelhardt versus \bar{r} , corrigidos por espessura de chapa [26].

2.3.3. Teste de Fukui

Este é o original (1957) combinado com o teste r e n . Aqui, um blank circular é estampado com um punção hemisférico em uma matriz cônica (figura 2.8). O critério é D_0 - o valor da peça cônica.

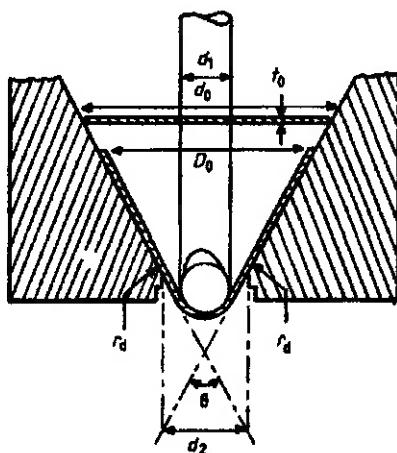


Figura 2.8: O teste de Fukui [26].

2.3.4. Teste de estampagem - estiramento

Este teste é uma combinação do teste de r e n devido a Boyles et al [8]. Aqui um punção hemisférico de 50 mm de diâmetro é utilizado, com lubrificação e um blank circular de grandes dimensões na medida para fraturar. O critério de teste é h^* , a altura para falha, que é devida a ambas as bordas estampadas (r) e estiramento (n) sobre a extremidade do punção. A figura 2.9 mostra a boa relação entre h^* e uma função de r , n e espessura da chapa.

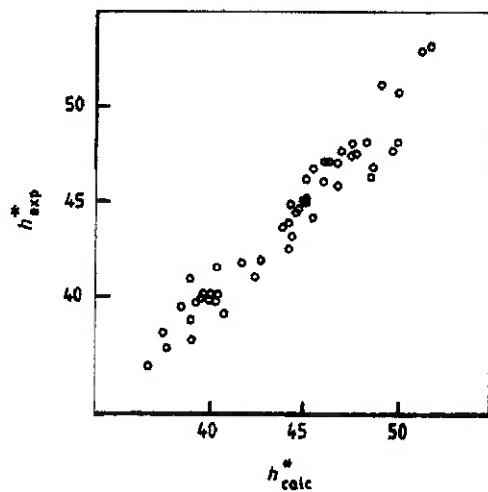


Figura 2.9: Relação h^* experimental e h^* calculado a partir de r , n e t_0 [26].

2.3.5. Teste de estiramento de tiras

Este teste estava baseado em uma observação de Drewes et al [9] e foi proposto por Ghosh [10]. Novamente, está combinado com o teste de r e n . Um gráfico de h^* versus e_1 , tirado de uma faixa de bandas de Nakazima et al [11], dá uma curva de forma semelhante a um FLD. Uma meta poderia ser comparar cada ponto com sua própria banda de Nakazima e o valor de h^* .

2.3.6. Teste de Yoshida

Este teste engenhoso é ilustrado na figura 2.10. A tensão aplicada ao longo das diagonais faz surgir um vinco, a altura do qual é medida [12]. Yoshida e Hayashi conseguiram boa correlação entre este teste e certas propriedades - σ_y , valores de r , n e n^* . Um problema com este teste aparentemente simples é uma faixa em torno do vinco de largura 40 mm. Em chapas finas, as fraturas tendem a acontecer nesta faixa, enquanto em chapas grossas tendem a ocorrer fora dela.

Lake [13] investigou este teste e concluiu que o resultado de teste de Yoshida poderia ser determinado $\frac{\sigma_y}{\sigma_u}$ o que facilitaria as medições.

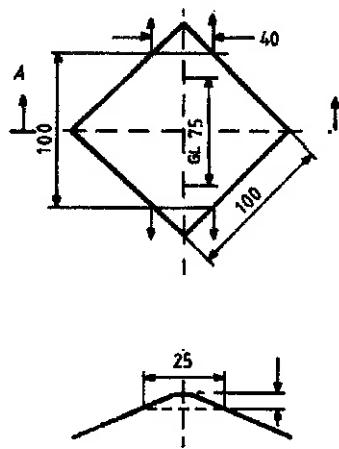


Figura 2.10: O Teste de Yoshida. As dimensões estão em milímetros [26].

2.3.7. Testes de expansão de furo de Siebel e Pomp

Dois testes oficiais existem sob este título, o teste do Instituto Kaiser Wilhelm desenvolvido por Siebel e Pomp (figura 2.11) [14] e o outro teste, chamado de teste de estampagem em alta velocidade, desenvolvido por Esser e Arend (figura 2.12) [15]. Este último, aparentemente, foi modelado sobre o anterior; os parâmetros de teste estão definidos nas figuras. Podem ser usados ambos os testes para detectar a direcionalidade nas chapas e também suscetibilidade para rachaduras, o ponto de ruptura em ambos os testes tem a aparência de uma trinca.

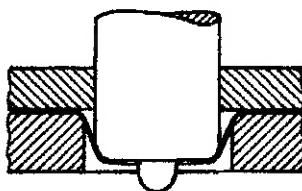


Figura 2.11: Teste do Instituto Kaiser Wilhelm [26].

Finalmente, d_1 deve ser a média de um número sensato de medidas de diâmetro, para o furo circular original transformar-se em um *quartic* na presença de anisotropia plana.

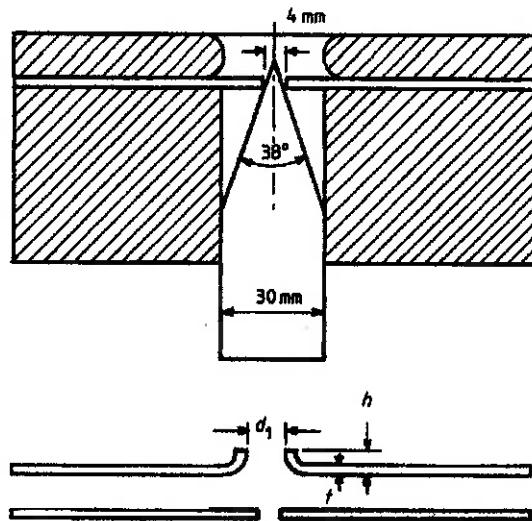


Figura 2.12: Teste de Esser-Arend. Índice Esser-Arend = $\left(\frac{d_1}{h}\right)100$ [26].

2.3.7. Teste de estampabilidade *Modul-r (sic)*

Este teste resultou da pesquisa de Stickels e Mould [16] que estavam estudando a relação fortuita entre módulo de elasticidade E e anisotropia cristalográfica em estampagem profunda de chapas de aço; eles também mediram convencionalmente r em tensão uniaxial. O valor de E foi calculado de:

$$E = \rho(2Lf)^2 \quad (2.3)$$

Onde: ρ é a densidade,

L é o comprimento da amostra e

f é a freqüência de ressonância.

A figura 2.13 mostra a correlação entre \bar{E} e \bar{r} , e a figura 2.14, entre β^* e \bar{E} , onde \bar{E} é o módulo de elasticidade médio.

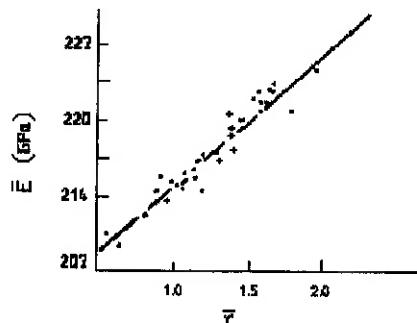


Figura 2.13: \bar{E} versus \bar{r} [26].

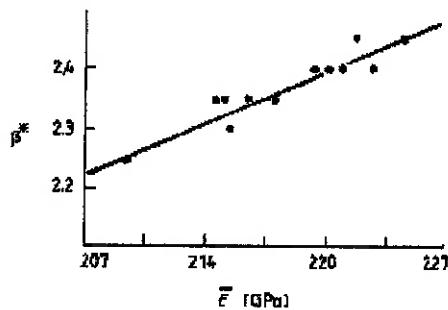


Figura 2.14: \bar{E} versus β^* [26].

Seguindo a publicação de Stickels e Mould [16] um aparelho de teste Modul-*r* (sic) de estampabilidade de chapas foi desenvolvido comercialmente; este era essencialmente um oscilador de restrição magnética,

fornecendo leituras de freqüência de ressonância de uma amostra retangular dimensões especificadas.

Dados adicionais também foram acumulados e depois de testados em 230 tipos de aços, a relação linear mostrada na figura 2.13 foi substituída por:

$$\bar{r} = \frac{101,44}{(\bar{E} - 38,83)^2} - 0,564 \quad (2.4)$$

Com um coeficiente de correlação de 0,92.

Este método para determinação do valor de r é rápido, para o teste a amostra é marcada com o blank e nenhuma preparação de extremidade é requerida. O tempo total para caracterização da estampabilidade dos valores Δr e \bar{r} é de aproximadamente 5 min. A precisão dos valores de r é de aproximadamente $\pm 0,1$.

2.3.8. Testes de Queda Livre

A resistência ao amassamento de peças estampadas é um assunto importante, mas longe de possuir um teste padronizado. Butler e Wallace [17] usando um ensaio de bulge test por conformação hidráulica mostraram o efeito da deformação sobre queda livre (figura 2.15) e

equipamentos do tipo mostrado na figura 2.16 tem sido largamente utilizados, produzindo os resultados mostrados na figura 2.17.

Deve-se ter em mente uma equação na forma:

$$P_d = K \cdot \sigma_y \cdot t^N \quad (2.5)$$

Onde: t é a espessura,

P_d é a “carga de queda” e

$N = 2,3 \sim 2,4$ e relaciona a carga de queda à tensão e espessura de chapa, e, como N é um valor alto, o efeito da espessura é amplificado. A figura 2.18 mostra que isto, de um modo geral, está correto para uma faixa de materiais, inclusive chapas plásticas.

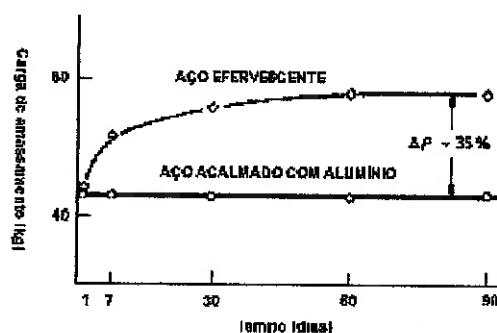


Figura 2.15: O efeito da deformação sobre a resistência à carga de queda.

P é a carga de penetração para produzir uma determinada profundidade de entalhe [26].

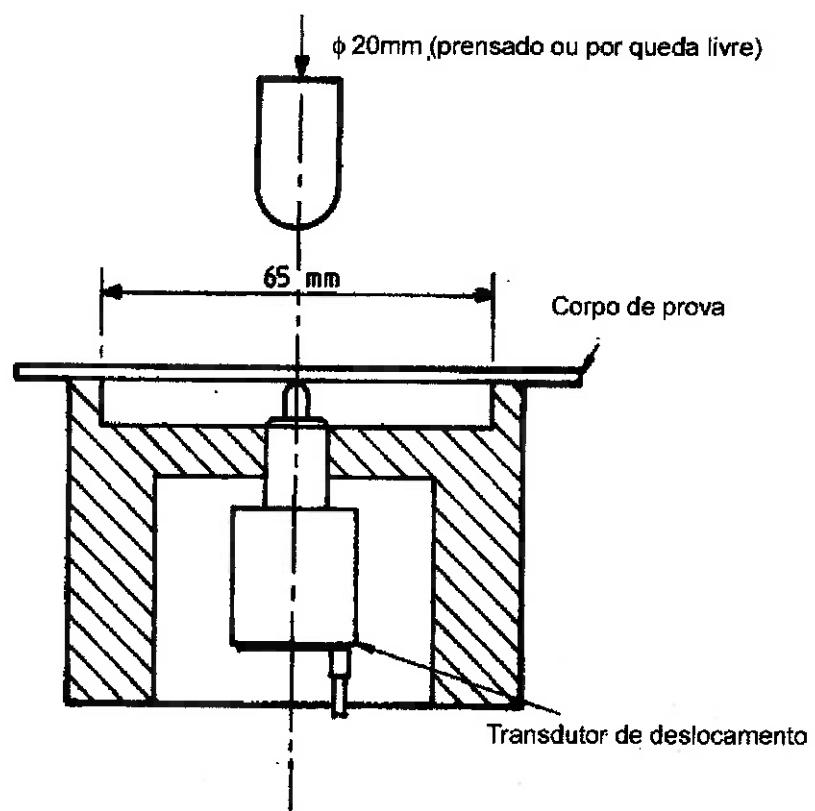


Figura 2.16: Equipamento típico para o Teste de Queda Livre [26].

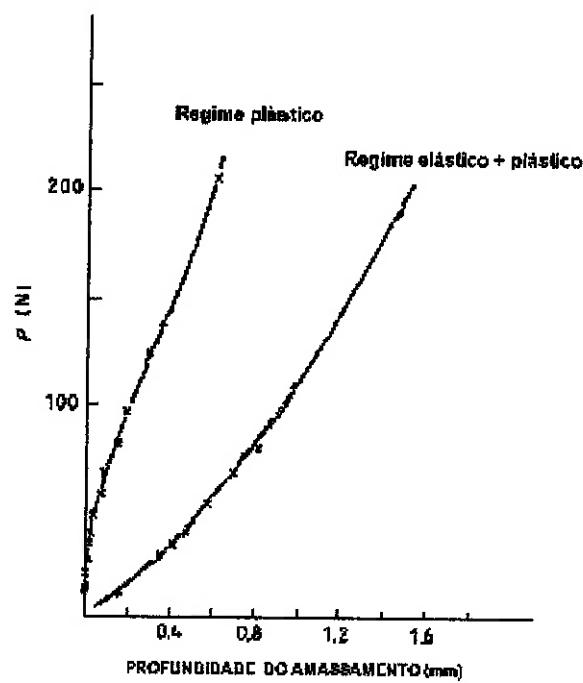


Figura 2.17: Resultados típicos obtidos através do uso do equipamento da figura 2.16 [26].

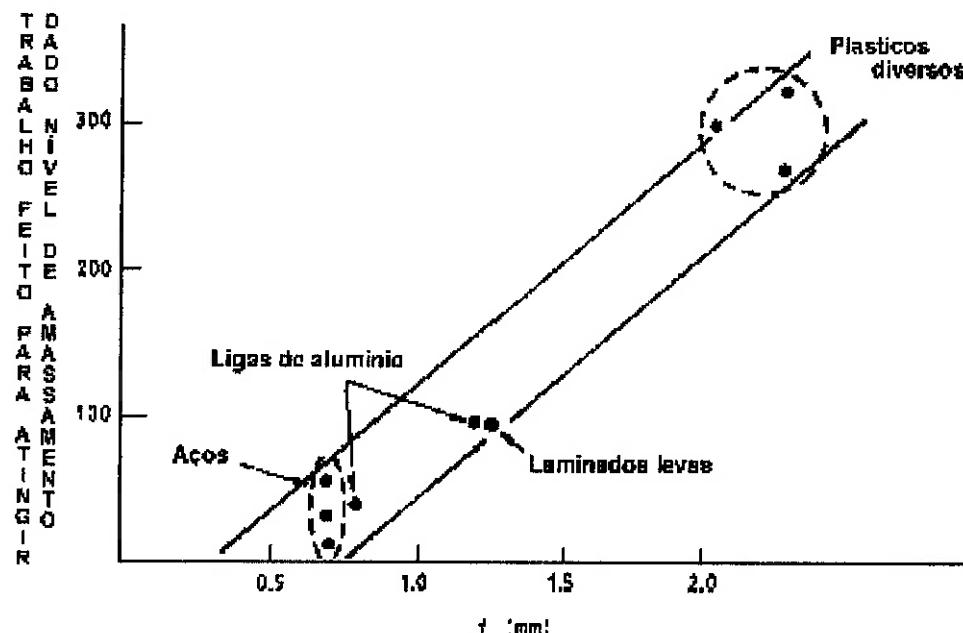


Figura 2.18: Trabalho realizado para produzir uma determinada profundidade de amassamento versus espessura para uma extensa faixa de materiais [26].

2.3.9. Teste de Estiramento de Marciak e Duncan et al.

Um problema com a manufatura de grandes prensas é mostrado esquematicamente na figura 2.19 onde, devida à carga friccional acumulada na superfície de um grande punção, a fratura pode acontecer na região B antes de ocorrer uma deformação plástica suficiente na região A. Esta situação foi simulada por um teste sugerido por Marciak, desenvolvido por Duncan et al [18] e modificado por Pearce [19]. A versão de Duncan et al é mostrada na figura 2.20. Este dispositivo do qual é possível obter valores de μ

entre a faixa e o rolete fixo, sustenta uma semelhança com a figura 2.19. Para isto pode ser mostrado que [20]:

$$\mu = \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2.6)$$

Onde: P_1 é a carga na perna vertical e

P_2 é a carga na perna horizontal; um fator de correção para flexão pode ser aplicado se isto for desejável.

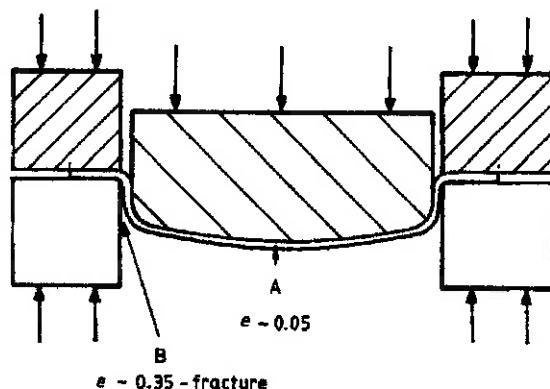


Figura 2.19: Ilustração de falta de deformação plástica no centro de uma grande prensa [26].

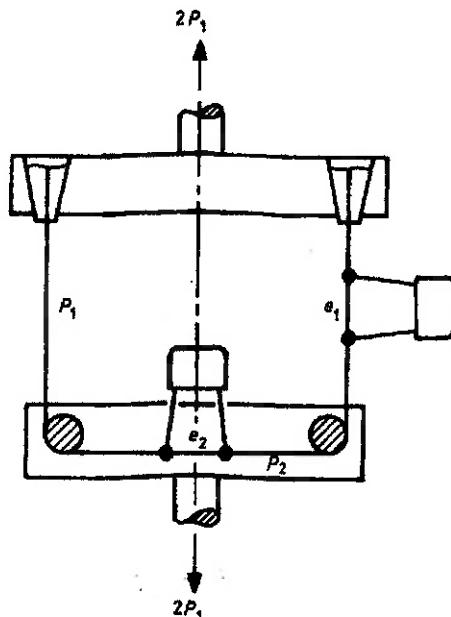


Figura 2.20: Simulação do teste da figura 2.19 [26].

O teste pode ser utilizado para investigar todos os aspectos da topografia de superfície, lubrificação e até mesmo a forma materiais.

Um exemplo do efeito de uma mudança de lubrificante sobre μ para um determinado material é mostrado na figura 2.21, enquanto a relação entre μ e a taxa de deformação e_h na perna horizontal sobre a deformação e_v na perna vertical para uma variedade de chapas e materiais é mostrado na figura 2.22.

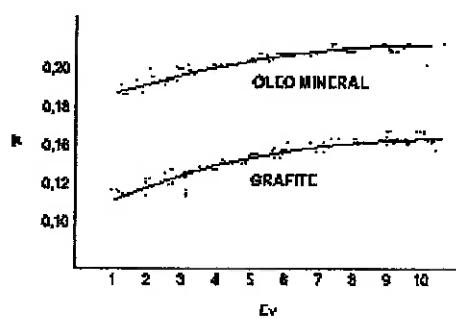


Figura 2.21: Efeito de mudança de lubrificante sobre um gráfico $\mu - E_v$, para a liga de alumínio 2117 [26].

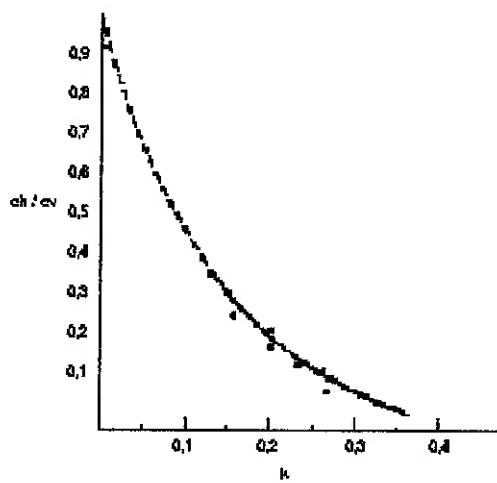


Figura 2.22: Relação entre μ e $\frac{\epsilon_h}{\epsilon_y}$ [26].

3. Ensaio de Expansão Hidráulica

O ensaio de expansão hidráulica foi o tipo de teste escolhido pela facilidade em ser executado, construção do dispositivo de ensaio relativamente simples, excetuando-se, por razões óbvias, as tampas superiores de fixação da chapa a ser ensaiada, cujos furos de perfis elípticos dos mais variados raios maiores e menores demandam a utilização de equipamentos de usinagem que assegurem uniformidade e precisão, tais como dispositivos CNC.

Far-se-á a análise na região de estiramento biaxial, determinando-se experimentalmente a trajetória da deformação até a fratura e teoricamente a trajetória do estado de tensão correspondente. Para tanto, serão utilizadas tampas de fixação da chapa a ser ensaiada cujos furos centrais apresentam perfis circulares e elípticos de dimensões previamente determinadas e conhecidas.

A metodologia de ensaio, bem como a análise teórica tomará por base trabalhos desenvolvidos por Bressan e Al Qureshi [21] e Reno [23].

3.1. Análise teórica

3.1.1. Introdução

A conformabilidade de chapas a frio depende, segundo Hecker [28], de três grupos de parâmetros:

- Parâmetros dependentes das propriedades intrínsecas do material, determinadas pelos métodos de fabricação da chapa;
- Parâmetros vinculados à geometria da ferramenta; e
- Parâmetros de processamento, que dependem da interação entre o material e a ferramenta.

Os parâmetros dependentes das propriedades intrínsecas do material são tradicionalmente obtidos pelo ensaio de dureza Rockwell. Apesar de sua simplicidade, problemas são encontrados na obtenção de medidas precisas para utilizá-las como índice de conformabilidade.

Limite de escoamento, alongamento uniforme e total, força máxima são medidos utilizando-se ensaio simples de tração do material estudado. A influência e a correlação com o desempenho do material de cada um dos parâmetros anteriormente citados irão variar de acordo com o modelo de corpo de prova utilizado.

O índice de anisotropia plástica R e o coeficiente de encruamento n que estão vinculados respectivamente à aptidão a estampagem profunda e à capacidade de deformação por estiramento, também são

determinados normalmente a partir de ensaios de tração uniaxial feitos em laboratório, fornecendo uma melhor indicação do comportamento do material.

Os parâmetros que dependem da geometria da ferramenta não podem ser determinados geralmente em laboratório, dependendo basicamente da habilidade e experiência do operador. Estes parâmetros estão mais ligados à fabricação de peças, não tendo grande importância em se tratando de ensaios de conformabilidade, uma vez que pode influenciar negativamente o resultado final.

A interação entre o material ensaiado e a ferramenta tem-se procurado simular em laboratório, através de diversos ensaios, como: Erichsen, Swift, Fukui, expansão hidráulica (objeto de estudo deste trabalho), Guyot, entre outros. A descrição destes ensaios, com exceção do de expansão hidráulica, pode ser vista no capítulo 2 deste trabalho. Cada um dos ensaios anteriormente enumerados contempla um determinado tipo de deformação de chapa.

Parte-se, agora, para a análise das operações de conformação e os parâmetros associados a estas operações.

3.1.2. Conformabilidade de uma chapa

As solicitações mecânicas a que a chapa é submetida dependem do processo de conformação empregado. A distribuição de tensões pode variar de ponto a ponto no material, podendo variar também ao longo do tempo durante o desenvolvimento da operação de conformação. Basicamente,

o material está sujeito a três modalidades de solicitações durante o processo de conformação:

- 1) Estampagem;
- 2) Estiramento do material; e
- 3) Dobramento sob tensão.

No processo de estampagem, o prensa-chapa não exerce pressão sobre a chapa, tendo então liberdade de fluir para o interior da matriz, acompanhando o movimento do punção.

Ao longo da superfície da chapa, no interior da matriz, atua a tensão de tração na direção radial.

Na operação de estiramento, a chapa é fixada na matriz perifericamente pelo prensa-chapa, que não a permite fluir livremente, sendo que a quantidade de material que flui para o interior da matriz, acompanhando o movimento do punção, é controlado pela compressão entre o prensa-chapa e a matriz.

Ao longo da superfície da chapa, no interior da matriz, atua a tensão de tração biaxial e, na direção da espessura da chapa, atua tensão de compressão.

A terceira operação fundamental é o dobramento, que ocorre nos cantos vivos ou sobre os raios do punção e da matriz de conformação. Ao aplicar o esforço na chapa, criam-se tensões variáveis através da espessura, que variam desde tração na superfície externa à compressão na interna.

Vale lembrar que no caso do ensaio de expansão hidráulica, objeto deste trabalho, a função do punção é desempenhada pelo fluido hidráulico, ou seja, a descrição acima é válida para o ensaio, mas

inconvenientes típicos do contato entre dois materiais metálicos, tais como atrito e geração de calor em função do contato das superfícies, têm seus efeitos minimizados em ensaios desta natureza, o que contribui para aumentar a fidelidade dos resultados obtidos.

A descrição acima baseia-se na figura 3.1:

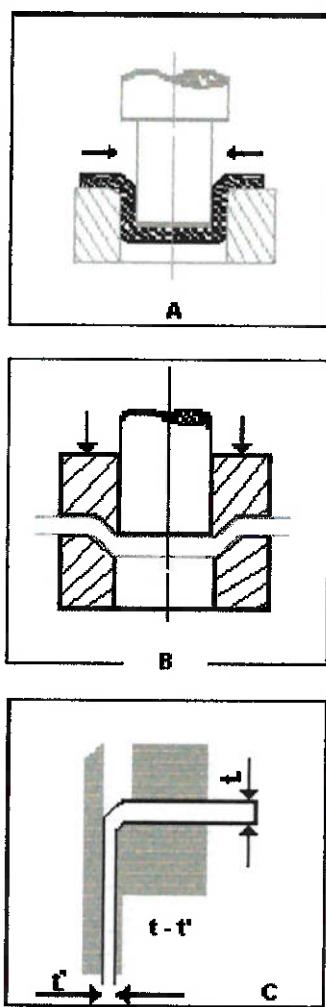


Figura 3.1.: Operações envolvidas na conformabilidade de uma chapa [23].
A: estampagem;
B: estiramento; e
C: dobramento – $t' < t$, dado o afinamento da chapa nesta operação.

O índice de anisotropia plástica **R** é definido por Lankford, como sendo:

$$R = \frac{\ln \frac{l_0}{l}}{\ln \frac{e_0}{e}} \quad (3.1)$$

Onde: l_0 – largura inicial do corpo de prova;
 l – largura final do corpo de prova;
 e_0 – espessura inicial do corpo de prova; e
 e – espessura final do corpo de prova.

O valor de **R** depende da direção do levantamento do corpo de prova em relação à direção de laminação, ou seja, 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação, donde define-se o índice de anisotropia normal:

$$R_n = \frac{1}{4}(R_0 + 2R_{45} + R_{90}) \quad (3.2)$$

A variação do valor **R** no plano da chapa é definida como:

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (3.3)$$

Quanto ao valor ΔR (anisotropia planar) é desejável que ele seja próximo de zero, pois a chapa terá menor propensão de formar orelhas na operação de conformação.

Uma propriedade importante do material, para que ocorra um bom desempenho na conformação por estiramento é o coeficiente de encruamento, ou valor n .

O coeficiente de encruamento para o aço extra-doce é obtido, admitindo-se para a curva tensão-deformação real uma expressão analítica da forma:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (3.4)$$

Onde: K – coeficiente de resistência;

σ - tensão real; e

ε - deformação real correspondente.

O valor de n , também depende da direção do corpo de prova, sendo assim define-se o coeficiente de encruamento normal, pela relação:

$$n_n = \frac{1}{4}(n_0 + 2n_{45} + n_{90}) \quad (3.5)$$

Um valor elevado de n de um metal indica que a região deformada apresentará uma resistência mecânica elevada, de modo a poder transferir à região não deformada o esforço necessário à sua deformação, isto é, a aptidão do metal distribuir as deformações quando na presença de um gradiente de tensões.

A obtenção de uma curva limite de conformação pode ser feita indistintamente a partir de peças conformadas numa operação industrial ou mediante ensaios laboratoriais que simulem o estado de tensões de um processo real de conformação.

O traçado desta curva depende da definição de pares de valores ε_1 e ε_2 das deformações nas direções das tensões principais.

Faz-se então, a reprodução de diversos carregamentos utilizados para simular o processo de conformação, sendo desejável que as condições sejam suficientemente diferentes de um carregamento para outro, de modo que, com um número reduzido de tipos de ensaio, seja possível cobrir todo o campo de pares (ε_1 e ε_2) de interesse.

Um dos ensaios utilizados com este intuito é o de Jovignot, que caracteriza-se pela ausência de atrito entre o esboço e a ferramenta (a conformação se dá por expansão hidráulica), obtendo-se as deformações principais menores ε_2 médias por uma série de estiramentos em matrizes circular e elípticas, variando de +0,17 a +0,45.

A devida preparação dos corpos de prova, bem como a medição e interpretação dos dados obtidos podem ser vistas nos tópicos a seguir.

4. Construção e Execução de Ensaios

O equipamento foi construído com base nos desenhos anexos a este documento. O dimensionamento não teve grande peso no projeto, uma vez que se trata de equipamento de manuseio simples e, principalmente, de feitio elementar. Os esforços a que está submetido não são significativos, poupando valiosas horas de estudo e projeto.

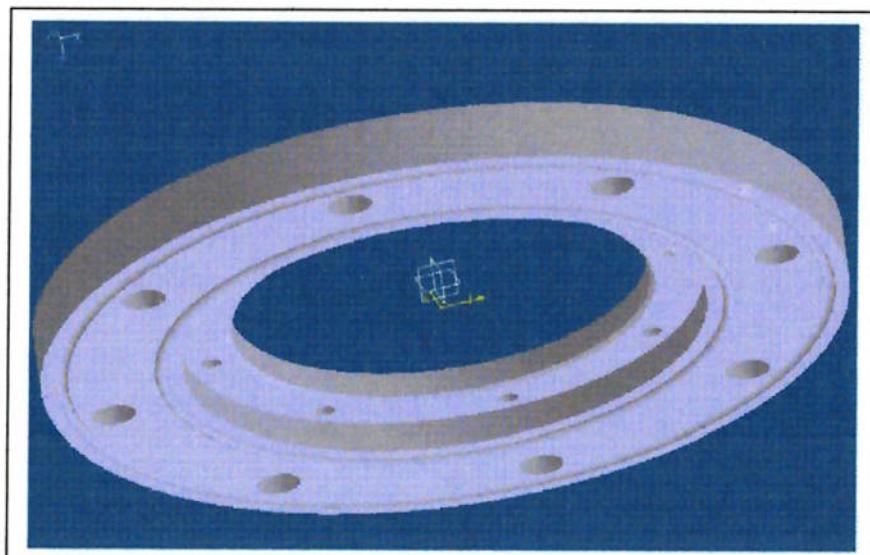
Apesar disso, suas formas seguem alguns dos dispositivos descritos na bibliografia, especialmente o dispositivo de Jovignot, de forma que os resultados a serem obtidos nos ensaios sejam coerentes e próximos aos encontrados por outros autores que fizeram uso de equipamentos de mesmo tipo.

Vale ressaltar que a maior dificuldade concentrou-se na fabricação das tampas superiores que fixam as chapas no dispositivo sendo necessário o uso de equipamento de corte a laser para assegurar a precisão dimensional das mesmas.

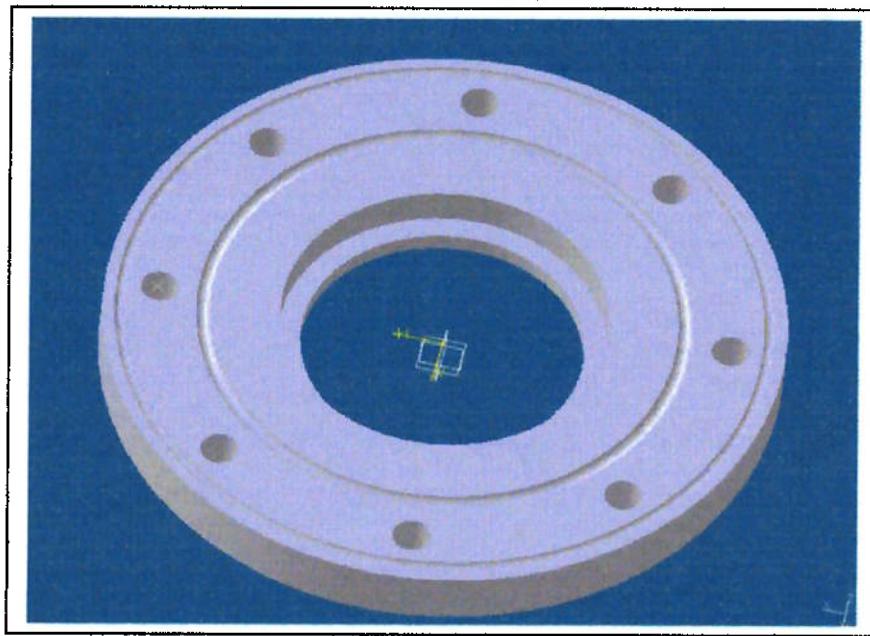
O dispositivo construído é constituído de três partes principais:

- a) Corpo – constitui a câmara de fluido hidráulico, além de permitir a fixação da tampa inferior (veda a parte inferior do corpo, além de receber em seu centro a conexão que liga o dispositivo à bancada hidráulica) e da tampa superior. É bipartido, de forma que as tampas superiores fiquem voltadas para o centro do dispositivo. Tal disposição permite que as chapas que

serão ensaiadas fiquem firmemente vinculadas ao equipamento, minimizando a possibilidade de vazamentos de fluido hidráulico. O corpo pode ser visualizado na figura 4.1, obtida no software CATIA;



(A)



(B)

Figura 4.1: Corpo cilíndrico. Em (A), pode-se visualizar a parte superior do corpo e em (B), a parte inferior [39].

- b) Tampas superiores – fixam o corpo de prova no corpo. É vazada e o perfil do furo central varia do circunferencial ao elíptico, permitindo avaliar a influência do perfil nos resultados obtidos na deformação do corpo de prova;
- e
- c) Tampa inferior – vedá a parte inferior do dispositivo, além de nele estar fixada a conexão que leva fluido ao interior do cilindro.

A figura 4.2 abaixo mostra o protótipo do dispositivo construído para a realização de estudos iniciais:

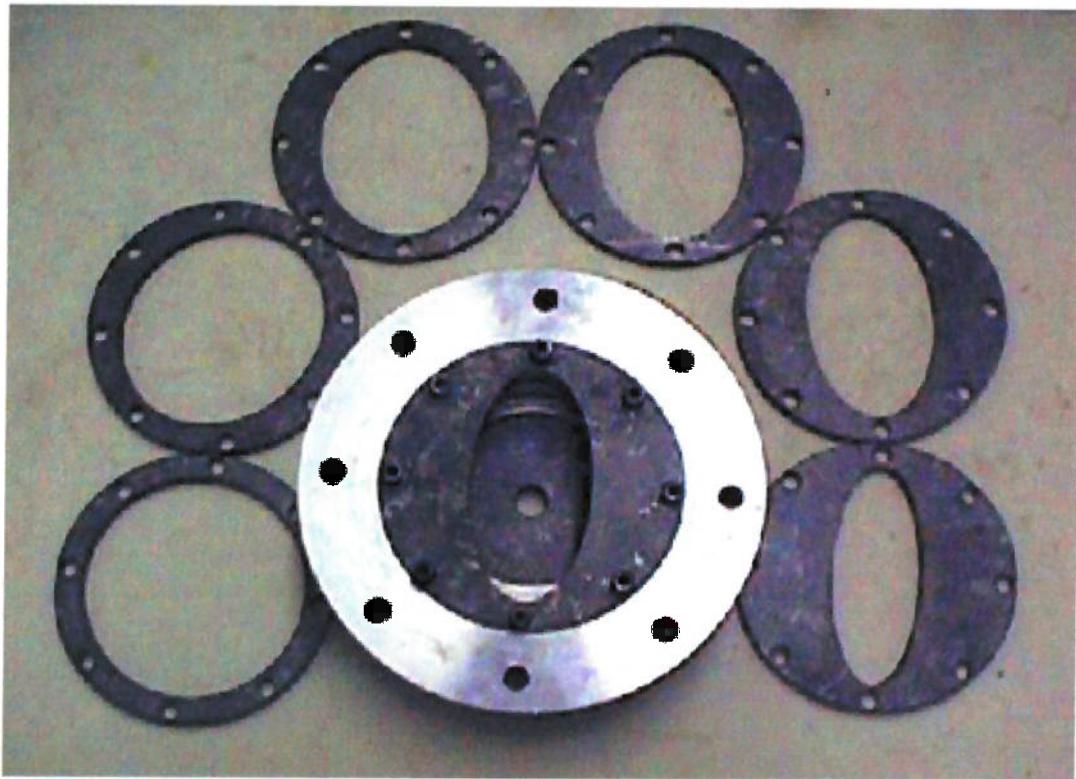
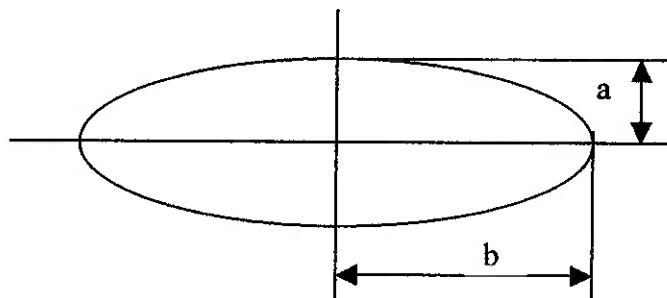


Figura 4.2: Foto do protótipo do dispositivo construído.

As tampas superiores e a inferior são de aço ABNT 1020 e o cilindro, de aço liga. A tabela a seguir, mostra a distribuição de raios menores e maiores do perfil dos furos centrais das tampas superiores:

TAMPA #	Raio menor a	Raio maior b
1	70	70
2	64	70
3	56	70
4	49	70
5	42	70
6	35	70
7	28	70



As medidas dos raios menor e maior estão em milímetros.

Faz-se a seguir, descrição do procedimento experimental, bem como a apresentação de dados que permitem avaliar corretamente os resultados obtidos da utilização do equipamento.

4.1. Procedimento experimental

O ensaio de estiramento biaxial por pressão hidráulica de chapas metálicas é precedido pelas seguintes etapas:

- Levantamento de dados das chapas metálicas (material, espessura em mm, limite de escoamento, limite de resistência, alongamento, coeficiente de anisotropia são os principais);
- Preparação das chapas para facilitar o trabalho de leitura após a deformação da mesma no dispositivo;
- Calibração dos instrumentos de medição; e
- Preparação do dispositivo de ensaio, verificação de estanqueidade da cavidade que receberá o fluido, capacidade de aperto dos parafusos que fixam a chapa e a tampa inferior, entre outros.

Realizado o ensaio, passa-se para a etapa de análise dos resultados obtidos.

4.1.1. Etapas de preparação do ensaio

O levantamento das propriedades dos materiais a serem ensaiados é fundamental para o sucesso do experimento. Sem eles, o estudo da deformação da chapa fica prejudicado, não sendo possível a montagem de

análises comparativas, determinação da faixa aceitável de utilização do material e descrição quantitativa do ensaio.

O acesso a esses dados tornou-se mais simples, uma vez que boa parte das grandes siderúrgicas disponibilizam na Internet dados sobre seus produtos. Consultando-se as páginas da ALCAN (www.alcan.com.br) e da USIMINAS (www.usiminas.com.br), por exemplo, é possível coletar dados sobre diversos tipos de chapas de alumínio e aço, respectivamente, produzidos através de processos a quente ou a frio.

O preparo das chapas a serem estudadas consiste em cortá-las em dimensões adequadas para sua colocação no dispositivo, assegurando que suas extremidades sejam tratadas (ou seja, eventuais rebarbas decorrentes do processo de corte sejam removidas). Vale lembrar que o corte da chapa deverá ser feito sem que a chapa sofra pré-deformações, o que invalida o resultado do ensaio. Por fim, a chapa precisa ser furada para permitir que os parafusos de fixação da tampa superior possam ser colocados. Novamente, o cuidado para não deformar a chapa deverá ser tomado.

A leitura ponto a ponto das deformações da chapa pode ser feita analisando-se a superfície da mesma. O procedimento torna-se mais preciso imprimindo-se rede de círculos, empregando-se para tanto três processos: fotográfico, eletroquímico e foto-gravura [23 & 27].

- Procedimento fotográfico – Tratamento que oferece boa nitidez, favorecendo boa precisão de medida. As etapas que compreendem o procedimento são:

- 1) Desengraxe da superfície da chapa a ser ensaiada utilizando-se tricloroetileno ou tetracloreto de carbono, substâncias com ação limpadora;

- 2) Lavagem em água corrente e secagem ao ar ou forçada;
- 3) Deposição de resina foto-sensível;
- 4) O negativo (filme em que está impressa a rede de círculos) é colocado sobre a resina. Sua acomodação é feita com auxílio de dispositivo pneumático;
- 5) A impressão da grade (rede de círculos) é feita com o uso de raios ultravioleta. A exposição ótima é de 5 minutos;
- 6) Faz-se, então, a revelação da impressão, mergulhando-se a chapa em líquido revelador apropriado durante 2 minutos;
- 7) Lava-se novamente em água corrente e a chapa é secada ao ar.

Sua desvantagem está no apagamento da gravação durante o processo industrial, além do que, é necessário o envio da chapa para um laboratório.

- Procedimento eletroquímico – O tratamento inicial da chapa é o mesmo do anterior (etapas 1 e 2) . Abaixo, seguem as etapas seguintes:

- 1) Imersão da chapa em solução de ácido fosfórico a 10% com o intuito de inibir a oxidação da mesma após o processo de gravação;
- 2) Uma tela semipermeável (stencil) é utilizada para a obtenção de um ataque seletivo na chapa, ou seja, somente a rede de círculos desejada será gravada na chapa com o uso desta tela;
- 3) Conecta-se, então, o pólo negativo de uma fonte retificadora a um absorvente contendo o eletrólito apropriado e o pólo positivo na chapa;

- 4) Após a realização da eletrólise, o eletrólito do esboço é limpo, neutralizando-o com solução de bicarbonato de sódio a 20%;
- 5) Por fim, a chapa é seca e protegida com óleo com o intuito de se proteger a chapa de corrosão.

Este processo tem sua utilização contestada, pois para chapas de pequena espessura, pode ocorrer a introdução de concentrações de tensão ao longo das linhas, influenciando negativamente os resultados obtidos no experimento. Torna-se, então, importante o controle do processo de eletrólise, de forma a interrompê-lo assim que a profundidade da gravação atinja limite pré-determinado.

Somado a este fato, as linhas não são suficientemente nítidas, prejudicando o trabalho de leitura e interpretação. Seu uso é mais difundido em escala industrial, em que não há grande importância em se obter precisão nos resultados. Outras vantagens: pode-se realizar o processo de gravação na própria fábrica, evitando-se o ônus do envio da amostra para um laboratório, trata-se de processo rápido e o processamento industrial não causa o apagamento da gravação.

- Procedimento de foto-gravura – A chapa é recoberta por uma película de resina foto-sensível que, uma vez queimada e revelada, dá origem à grade impressa. Um ataque químico grava na chapa o modelo já “traçado” pelo procedimento fotográfico.

As vantagens deste processo são: nitidez das linhas e boa resistência ao apagamento durante o processo industrial. Porém, trata-se de tratamento caro, demorado e de difícil realização em ambiente industrial. Assim

como o processo eletroquímico, o ataque à chapa é o principal problema do procedimento, uma vez que pode ocorrer a introdução de concentração de tensão.

A seguir, pode-se visualizar a aparência das chapas após gravação utilizando cada um dos procedimentos anteriormente descritos:

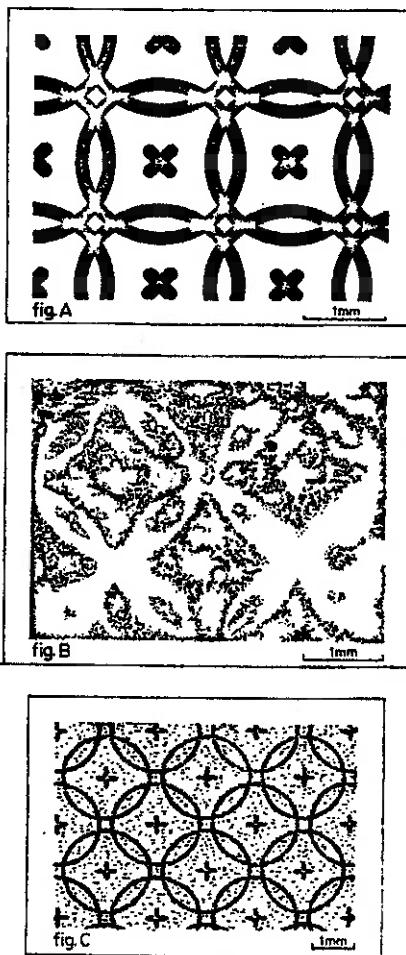


Figura 4.3: Chapas gravadas utilizando-se os procedimentos anteriormente descritos [23]:

Figura A – Procedimento fotográfico;

Figura B – Procedimento eletroquímico; e

Figura C – Procedimento de foto-gravura.

A grade utilizada no processo de gravação é, como foi anteriormente citado, a rede de círculos que, após a deformação, transformam-se em elipses ou círculos maiores, em que os eixos são as direções principais da deformação no plano da chapa. Estes círculos podem ser separados (fig. A), tangenciais (fig. B), secantes (fig. C) e entrelaçados (fig. D), conforme mostra a figura 4.4.

O diâmetro de cada um dos círculos é da ordem de alguns milímetros, variando conforme a precisão desejada e o tipo de ensaio.

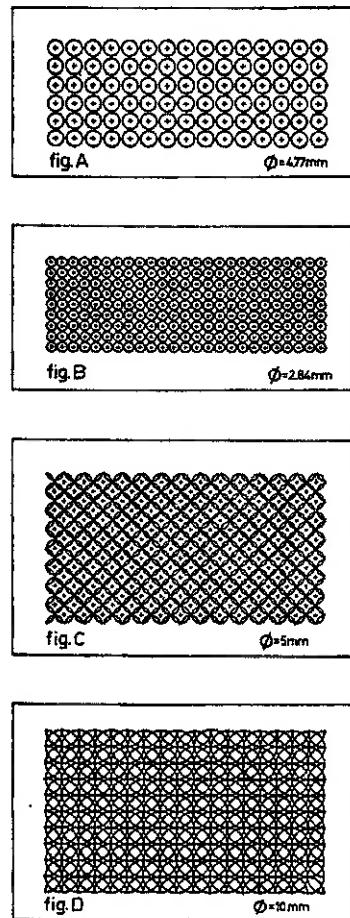


Figura 4.4: Grades geralmente empregadas para o ensaio de expansão hidráulica [23].

Naturalmente, o dispositivo tem de ser conectado a uma bancada hidráulica, que irá suprir o ferramental de fluido pressurizado. O fluido é o principal agente de conformação da chapa ensaiada.

Instrumentos de medição necessários para o experimento são relógio comparador, posicionado no centro da chapa a ser deformada, manômetros de controle da pressão do fluido que é injetado na câmara do dispositivo e torquímetro, para medir o torque aplicado sobre os parafusos que prendem a tampa superior ao equipamento.

A calibração assegura a fidelidade dos valores fornecidos por esses instrumentos, evitando distorções inesperadas nos resultados.

Feito os ajustes e etapas anteriores, resta verificar o dispositivo quanto a vazamentos. Para tanto, é interessante preparar chapas adicionais para ajustar parâmetros como pressão do fluido e fixação dos parafusos, antes da realização definitiva do experimento.

4.1.2. Execução dos ensaios

Feita a preparação, inicia-se o experimento. Este pode ser desenvolvido das mais diversas formas, dependendo diretamente das informações buscadas. A tabela abaixo mostra algumas das possibilidades:

#	Mesmo material?	Mesma espessura?	Mesmo fabricante?
1	SIM	NÃO	SIM
2	SIM	SIM	SIM
3	SIM	SIM	NÃO
4	NÃO	NÃO	SIM
5	NÃO	SIM	SIM
6	NÃO	SIM	NÃO

Feita a definição do tipo de ensaio, as etapas que dizem respeito ao ensaio propriamente dito são simples, bastando que os procedimentos descritos no item 4.1.1 tenham sido corretamente realizados.

O ensaio em si consiste em injetar fluido na câmara do dispositivo a pressão constante até que a chapa se deforme. Para se evitar acidentes e padronizar a coleta de dados, pode-se, por exemplo, determinar certo intervalo de tempo para o qual a câmara receberá óleo sem que haja o rompimento da chapa.

A pressão do fluido seria ajustada conforme os limites de escoamento e de resistência de cada material, de modo que os resultados obtidos atinjam a máxima confiabilidade.

4.2. Interpretação de resultados

Os resultados obtidos podem ser avaliados medindo-se os pontos da malha impressa na superfície da chapa. Da relação tensão aplicada X deformação gerada obtida ponto a ponto de cada chapa ensaiada, é possível estabelecer comparações entre as chapas.

A medição é feita nas circunferências gravadas que sofreram as maiores deformações. Deve-se, porém, respeitar-se os seguintes pontos, com o intuito de evitar elevadas dispersões:

- O círculo a ser medido é aquele em que a fratura do corpo de prova tenha se iniciado;
- A fratura ou deformação localizada deve passar pelo centro da elipse;
- A orientação da fratura ou estrição deve estar de acordo com a orientação da curva-limite com respeito à direção. Por exemplo, se a curva-limite traçada é para fraturas ocorrendo paralelamente à direção de laminação, todos os pontos da curva devem corresponder às deformações de fraturas paralelas à direção de laminação.

No caso dos círculos, as deformações principais coincidirão sempre com os eixos maior e menor da elipse que se forma no estágio de conformação em questão por algum dos métodos citados a seguir.

Se a medição for feita no chão-de-fábrica, ou seja, na estamparia de alguma empresa, pode-se empregar régua de aço para peças

de grandes dimensões e de grandes raios ou, régua plástica flexível (*taper plate*) para peças de pequenas dimensões e de raios pequenos, já graduados em percentagem de deformação logarítmica ou aritmética, obtendo-se com este processo uma precisão máxima de aproximadamente 5% [29].

A precisão requerida nos aparelhos de medidas das grades em laboratório é da ordem de 1% [30]; sendo assim utiliza-se normalmente um banco micrométrico acoplado a um projetor de perfil.

Conhecendo-se o diâmetro inicial dos círculos (D_0), basta medir os eixos maior (D_1) e menor (D_2) da elipse obtida após a conformação, para determinar localmente as deformações principais no plano da chapa, segundo a relação:

$$\varepsilon_i = \int_{D_0}^{D_i} \frac{dD}{D} = \ln \frac{D_i}{D_0} \quad (4.1)$$

Onde o sub-índice i assume o valor 1 para a deformação principal menor e 2, para a deformação principal maior.

Quando mede-se uma deformação a partir de uma grade de círculos de diâmetro D , obtém-se um valor médio das deformações pontuais sobre um segmento de reta de comprimento D . Considerando-se os gradientes de deformação existente no momento da fratura, verifica-se que o valor da deformação medida é tanto maior, quanto menor for D .

A curva limite de conformação (C.L.C.) é resultante da plotagem dos pares ε_1 e ε_2 obtidos experimentalmente através de sucessivos ensaios distintos entre si, ou seja, com carregamentos diversos. Obviamente,

as mudanças nestes carregamentos têm de ser controlados para que não haja descontrole.

As deformações obtidas no ensaio de tração biaxial correspondem ao extremo direito da C.L.C., cujos estudos concentram-se mais em nível laboratorial, uma vez que conformações que envolvem este tipo de deformação não causam problemas industrialmente.

O dispositivo construído tem por objetivo justamente permitir o levantamento das deformações para se construir a C.L.C.. Uma vez determinada a curva experimental, parte-se para a análise comparativa.

Cabe aqui uma explicação mais detalhada das C.L.C.. A grade de círculos impressa na chapa ensaiada deforma-se de forma distinta conforme o tipo de carregamento a que é submetida a chapa. Existe uma relação entre a distorção dos círculos e o tipo de deformação, que pode ser vista graficamente na figura 4.5.

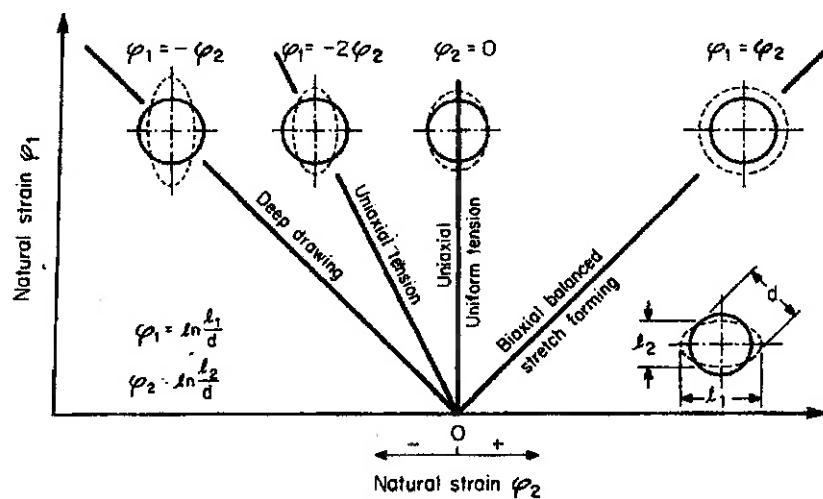


Figura 4.5: Diagrama que mostra as deformações obtidas nos diversos ensaios de conformação, em especial o de tensão uniaxial [26].

A realização de uma série de ensaios possibilita determinar combinações de máxima tensão (correspondente ao raio maior da elipse) e mínima deformação (perpendicular à máxima tensão e correspondente ao raio menor da elipse) para os quais não tenha ocorrido escoamento nem fratura do material. São esses valores que são utilizados para determinar as C.L.C., que podem ser vistas na figura 4.6.

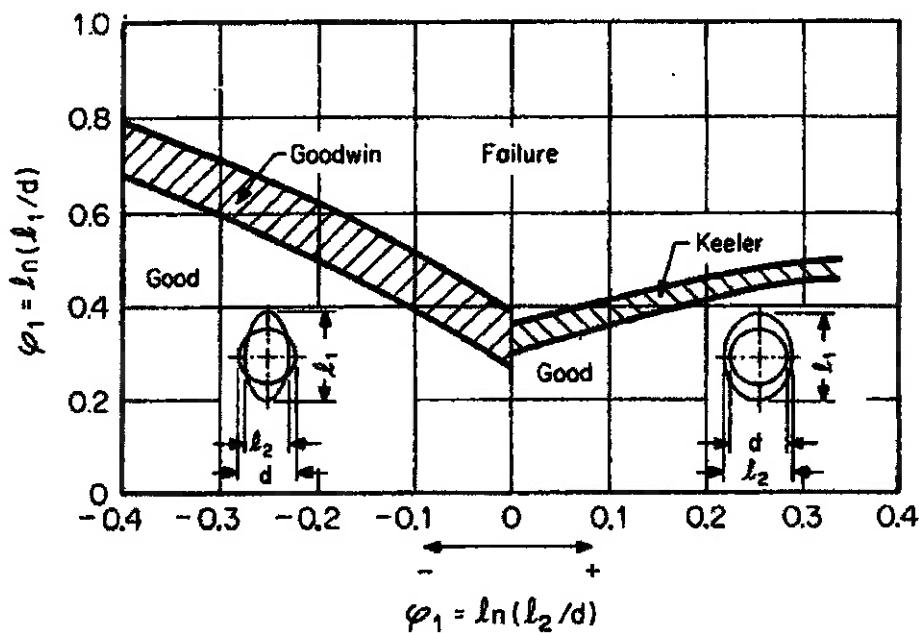


Figura 4.6: Curva limite de conformação (Goodwin [32], Keeler [31, 33]) [26].

As C.L.C. devem ser traçadas de acordo com o material ensaiado, sendo que este tem de ter suas propriedades claramente definidas. As curvas definem duas zonas – fratura e início do escoamento. As deformações traçadas são aquelas de pontos críticos, isto é, os pontos em que

trincas e rachaduras poderiam ter início de formação. Entre duas zonas, 'boa' e de 'falha', há uma zona crítica para deformação. Estas zonas são ditas de instabilidade.

As C.L.C. podem ser obtidas conduzindo experimentos para diferentes zonas. O método mais largamente utilizado para a obtenção das curvas é o de estampagem profunda de tiras metálicas utilizando-se para tanto punções hemisféricos. As diferentes condições de tensão são simuladas através de mudança de larguras das tiras. Melhorias para este método foram introduzidas utilizando-se tiras circulares, conforme se pode observar na figura 4.7 [34]:

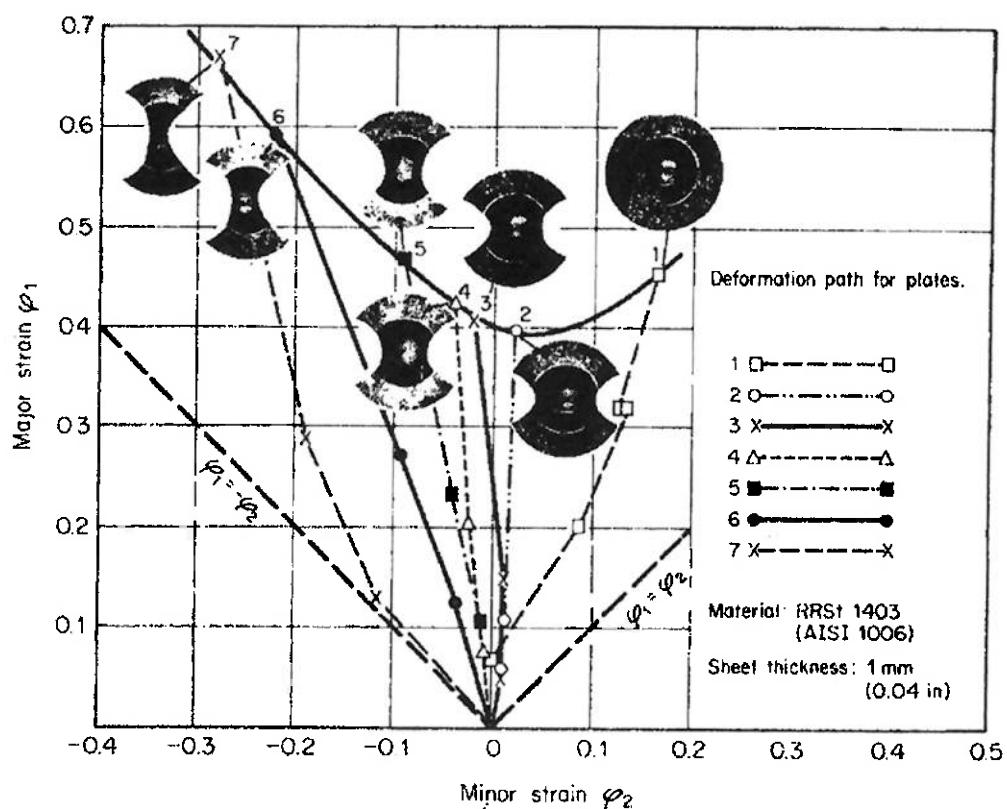


Figura 4.7: Curvas Limite de Conformação obtidas com a utilização de tiras circulares especialmente preparadas [26].

As tiras do material são estampadas profundamente até que fissuras surjam. Com os dados obtidos dos ensaios, as C.L.C. podem ser obtidas para séries de trajetórias de deformações advindas de tensão biaxial para tensão e compressão equivalentes. As C.L.C. são influenciadas também pelo diâmetro da grade circular impressa na amostra, a posição relativa da tira com relação à direção de expansão, o lubrificante, a espessura do material ensaiado e a taxa de deformação.

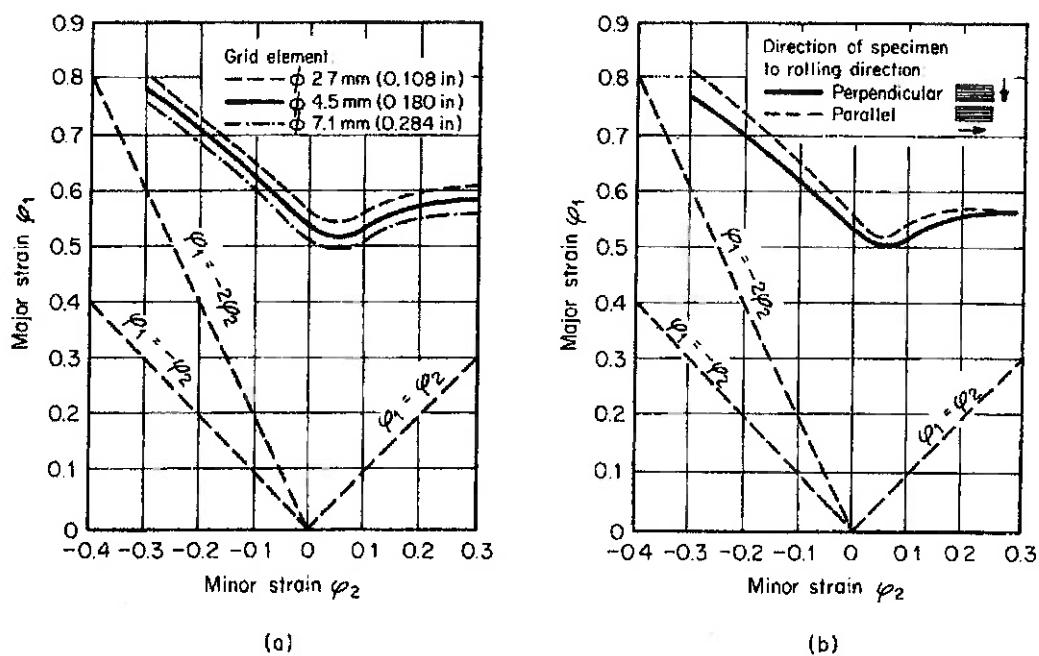


Figura 4.8: Influência do tamanho da grade circular impressa (a) e anisotropia planar na C.L.C. (b) [26].

Como mostrado na figura 4.8a, a C.L.C. muda conforme é alterado diâmetro dos círculos da grade impressa. A precisão na determinação da localização de fissuras ou zonas de escoamento aumenta com a redução do diâmetro dos círculos que compõem a grade. A influência da anisotropia planar é pequena mas significativa para a tira de aço RRSt 1403 (AISI1006) de acordo com a figura 4.8b. A influência da lubrificação pode ser vista na figura 4.9a. Melhorando-se a lubrificação (camada plástica revestindo a tira ensaiada comparada com estampagem lubrificada com óleo) a curva limite suaviza-se com o aumento dos valores de deformação. O mesmo ocorre quando a espessura da chapa ensaiada é variada, conforme mostra a figura 4.9b.

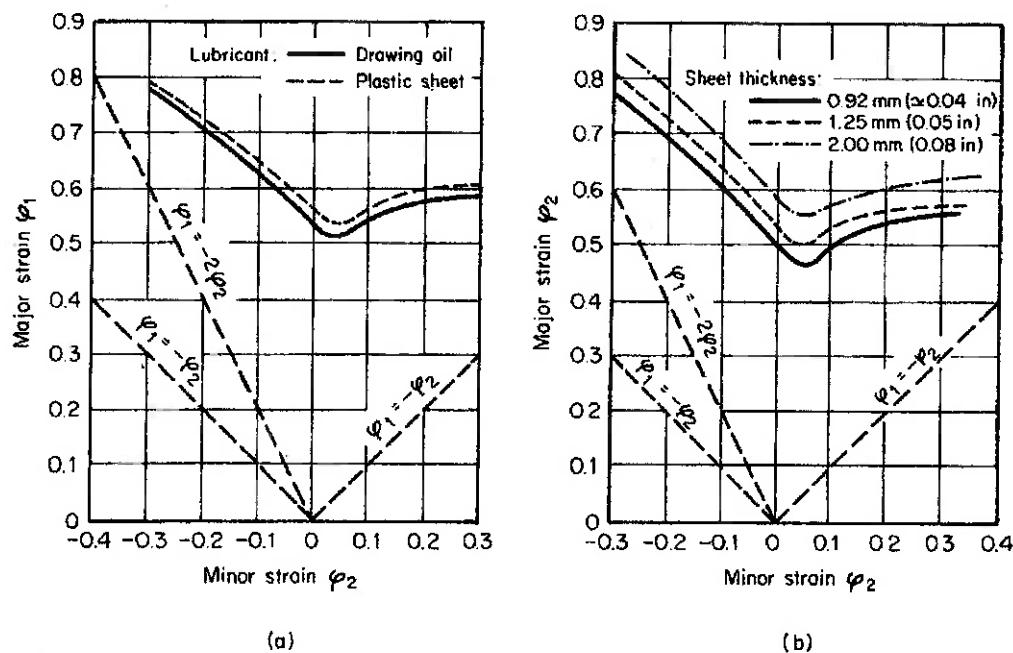


Figura 4.9: Influência da lubrificação da chapa (a) e da espessura da chapa ensaiada (b) [26].

A influência na taxa de deformação, de qualquer forma, foi muito pequena, e pode ser desprezada especialmente se aplicada à velocidade e condições normalmente encontrada em processos industriais.

Mais recentemente a deformação ou histórico da mesma foi levado em consideração por Hašek [35], Makazima et al. [36], Müschenborn e Sonne [37], Matsuoka e Sudo [38], e outros. Isto poderia ser mostrado como no diagrama apresentado na figura 4.6. Porém, tal diagrama somente é válido para taxas de deformação constantes ($d\varphi_2/d\varphi_1 \approx \text{constante}$) durante todo o processo. Isto é, de qualquer forma, não é verdadeiro em muitos casos, pois as taxas de deformação sob estado plano de tensões podem mudar significativamente. Conseqüentemente, de acordo com a figura 4.10, a C.L.C. é influenciada consideravelmente. Se, por acaso, o estiramento uniaxial

$(\varphi_1 = -2\varphi_2)$ é seguido por um estiramento biaxial ideal ($\varphi_1 = \varphi_2$) – linha ACD – a C.L.C. é trocada por uma alta taxa de deformação se comparada com a linha P (taxas de deformação constantes) – linha AB. Por outro lado, estiramento uniaxial ($\varphi_1 = -\varphi_2$) seguida de estiramento biaxial ideal ($\varphi_1 = \varphi_2$) – linha AEF – irá direcionar o experimento para valores mais baixos de limites de deformação.

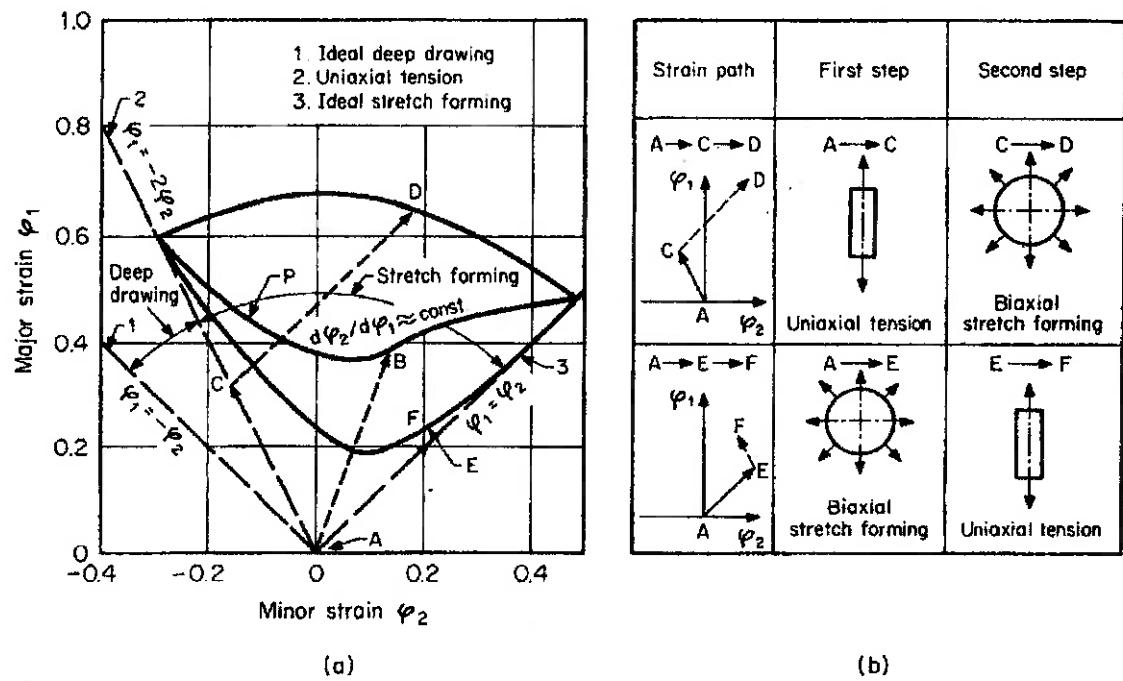


Figura 4.10: Histórico de deformação e a estrutura da C.L.C.. (a) Influência do histórico de deformação na localização da C.L.C. (b) Representação esquemática de várias trajetórias de deformação [26].

Sob condições industriais, a trajetória da deformação pode ser fortemente influenciada por muitos parâmetros, como por exemplo, a força exercida pelo prensa-chapa e sua geometria, geometria do punção, raio de

curvatura da matriz, lubrificação, anisotropia, espessura e tamanho da chapa a se ensaiada e as propriedades mecânicas do material.

A etapa mais importante da interpretação dos dados consiste na comparação dos valores obtidos experimentalmente com valores obtidos teoricamente através de cálculos empíricos e, por fim, a comparação destes dois últimos com valores obtidos através de simulação numérica utilizando-se para tanto da teoria de elementos finitos.

O desenvolvimento de programas computacionais cada vez mais robustos tem permitido reduzir significativamente o tempo gasto no desenvolvimento de projetos, uma vez que os valores obtidos nas simulações têm se aproximado com alta fidelidade dos valores obtidos experimentalmente [24].

Isso significa que, apesar do investimento inicial elevado para aquisição do programa, seu uso permite poupar intermináveis horas de ensaios experimentais. Uma vez que esta etapa é a mais onerosa de um projeto, pode-se concluir que a amortização do investimento é feita rapidamente.

5. Conclusão

Os objetivos deste estudo foram atingidos satisfatoriamente. Construiu-se um protótipo inicial, que tem sido continuamente melhorado, o que impediu a realização de alguns ensaios para confronto com dados obtidos através de simulação numérica. No atual estágio, as tampas superiores passam por trabalho de usinagem de raio de curvatura e polimento na face que interage diretamente com a chapa ensaiada.

O corpo cilíndrico (partes superior e inferior) irá receber friso circular de raio 4mm (ressalto na parte superior e cavidade na inferior) cuja função é de prensa-chapa. Ademais, estão sendo estudados e implementados meios de se evitar o vazamento de fluido nas junções, com a utilização de *o'ring*s e adesivos a base de borracha de silicone.

Vale ressaltar a importância dos ensaios, uma vez que a partir dos resultados, é possível obter as C.L.C., de fundamental importância para a determinação de parâmetros de trabalho de estampagem de chapas. A determinação experimental permite confrontar de maneira mais confiável os resultados obtidos através de simulação numérica.

6. Motivação para trabalhos futuros

Como motivação para trabalhos futuros, pode-se enumerar os seguintes temas:

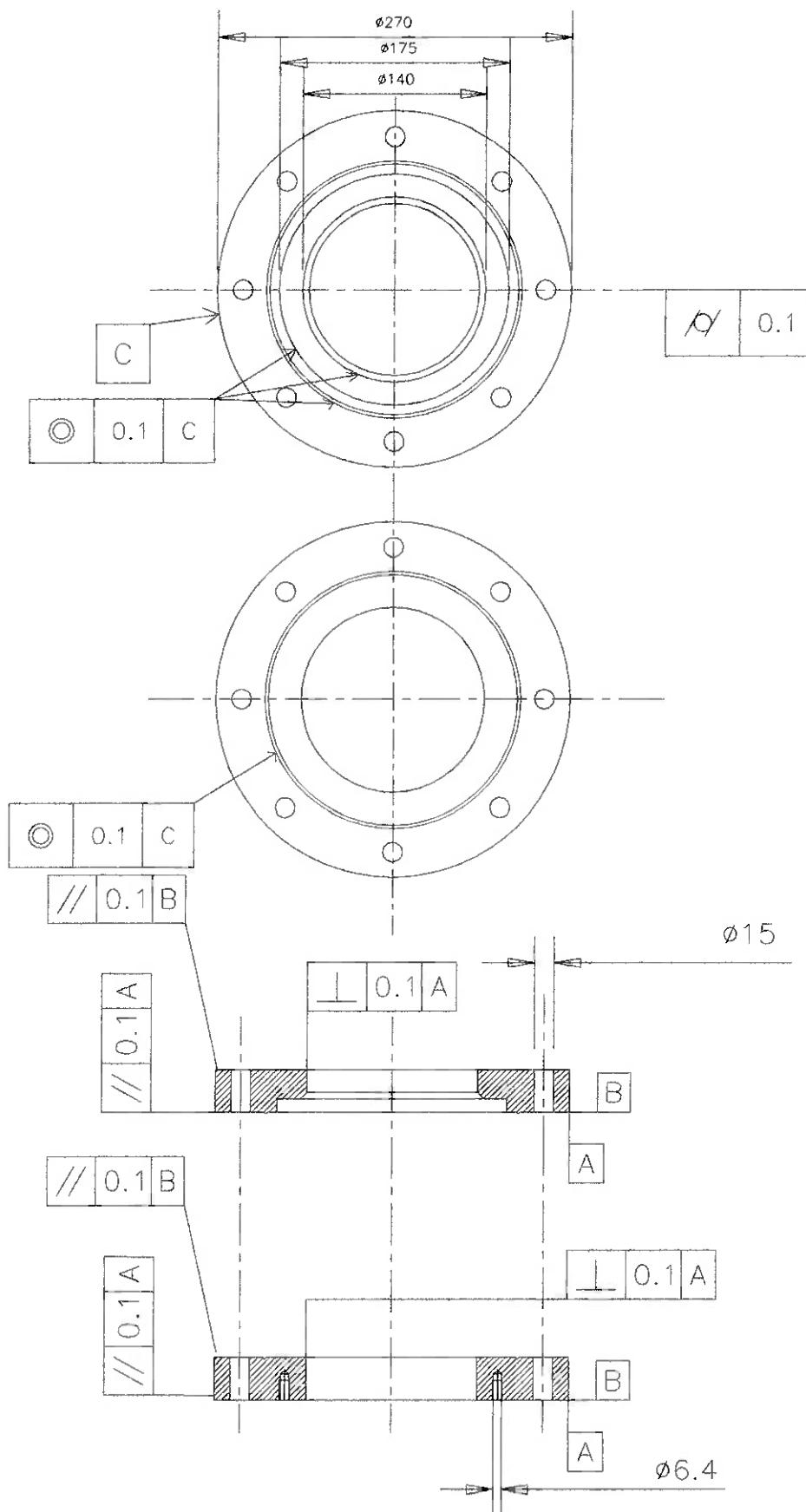
- Instrumentação adequada do dispositivo, aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos no experimento;
- Montagem de tabelas comparativas com os dados obtidos com o uso do dispositivo, teoricamente e por simulação numérica;
- Aprimoramento do dispositivo, buscando simplificar o trabalho de ensaio das chapas.

7. Referências Bibliográficas

- [1] Bordinassi, Éd Cláudio & Tabegna, Júlio – **Confiabilidade aplicada a uma ferramenta de estampagem profunda**; EPUSP – 2001;
- [2] Erichsen, A. M. – **Stahl Eisen**; 1914;
- [3] Hecker, S. S. – **Met. Eng. Q.**; 1974;
- [4] Swift, H. W. – **J. Mec. Phys. Solids**; 1951;
- [5] Atkinson, M. – **Sheet Met. Ind.**; 1967;
- [6] Wilson, D. V., Mirshams A. R. & Roberts W. T. – **Developments in the Drawing of Metals**; London: Metal Society; 1966;
- [7] Atkinson, M. – **SCW Research Department Report MR/E/22a/7**; 1968;
- [8] Boyles, M. W., Haberfeld A. B. & Chilcott H. S. – **Proc. 8th IDDRG Bienn. Congr.**; Gothenburg - 1974;
- [9] Drewes, E-J, Görl E. & Hennig H. – **Working Group 1; International Deep Drawing Research Group** – Dusseldorf – 1981;
- [10] Ghosh, A. – **Met. Eng. Q.**; 1975;
- [11] Nakazima, K., Kikuma T. & Hasuka K. – **Yamata Technical Report**; 1972;
- [12] Yoshida, K. & Hayashi, H. – **Proc. Int. Symp. On New Aspects of Sheet Metal Forming**; Tokyo: Iron and Steel Institute of Japan – 1981;
- [13] Lake, J. H. – **Proc. 13th IDDRG Bienn. Congr.**; Melbourne: Australian Institute of Metals; 1984;
- [14] Siebel, E. & Pomp A. – **Mitt. Kaiser Wilhelm Inst. Eisenborsch**; Dusseldorf – 1930;
- [15] Esser, H. & Arend H. – **Arch. Eisenhüttenwes**; 1940;
- [16] Stickels, C. A. & Mould P. R. – **Metall. Trans.**; 1970;
- [17] Butler, R. D. & Wallace J. F. – **Iron and Steel Institute Special Report**; 1963;
- [18] Duncan, J. L., Shabel, B. S. & Gerbase Filho, J. – **Society of Automotive Engineers Paper 780361**; 1978;
- [19] Pearce, R. – **Developments in the Drawing of Metals**; London: Metals Society – 1979;
- [20] Littlewood, M. & Wallace J. F. – **Sheet Metal Ind.**; 1973;
- [21] Bressan, J. D. & Al Qureshi, H. A. – **Comportamento da Tensão e Deformação em Chapas Metálicas Durante a Conformação por Pressão Hidráulica**; 4º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – UFSC – 1980;
- [22] Castro, A. & Pearce, R. – **The Biaxial Stress-Strain Behaviour of Sheet under a Wide Range of Stress Ratios**; Cranfield Memo – nº 53 – 1973;
- [23] Reno, R. T. – **Conformabilidade e Textura de Chapas Finais de Aço Acalmado ao Alumínio**; Tese de Mestrado - EPUSP – 1985;
- [24] Silva, E. C. N. – **Mecânica Computacional**; EPUSP – 2002;
- [25] Marcinia, Z. & Duncan J. – **Mechanics of Sheet Metal Forming**; 1991;
- [26] Pearce, R. – **Sheet Metal Forming**; 1991;
- [27] Pellegrini, M. T. – **A Influência do Tamanho Médio de Grão na Conformabilidade de Chapas Metálicas na Região de Estiramento**; Tese de Mestrado - EPUSP – 1989;
- [28] Hecker, S. S. – **A simple Limit Curve Technique and Results, on Aluminium Alloys**; IDDRG – Amsterdam – October, 1972;

- [29] Bruno, L. F. C.; Bresciani Fº, E. – *Uso de Grelhas de Círculos Impressos e Curvas Limites de Conformação na Avaliação da Conformabilidade de Chapas Finas*; Metalurgia – ABM – Vol.34 – Nº245 – Abril, 1978 – p. 285~290;
- [30] Rondé-Oustau, F. – *Courbe Limites D'emboussissage – Microstructure et Chemins de Déformation* – Thèse de Docteur – Ingénieur – Université de METZ; 4 mai 1977;
- [31] Keeler, St. P.; *Determination of Forming Limits in Automotive Stamping*; Sheet Metal Ind.; 42, 1965;
- [32] Goodwin, G. M.; *Application of Strain Analysis to Sheet-Metal Forming Problems in the Press Shop*; La Metall. Ital.; 60, 1968;
- [33] Keeler, St. P.; *Circular Grid System – A Valuable Aid for Evaluating Sheet-Metal Formability*; Sheet Metal Ind.; 45, 1968;
- [34] Hasek, V., and Lange, K.; *Forming-Limit Diagram and Its Applications in Deep-Drawing and Stretch-Forming Processes*; (in German); Wirtsch Z. Ind. Fertig.; 70, 1980;
- [35] Hasek, V., and Lange K.; *On the Strain and Stress Condition in Drawing Large Irregular Workpieces*; (in German); Berichte aus dem Institut für Umformtechnik; Universität Stuttgart, nº25; Essen, Girardet, 1973;
- [36] Makazima, K., Kikuma, T., and Hasuko, K.; *Study of the Formability of Steel Sheets*; Yawata Tech. Rep.; 284, 1968;
- [37] Müschenborn, W., and Sonne, H. M.; *Influence of Strain Path on the Forming-Limit Diagram of Sheet Metal*; (in German); Arch. Eisenhüttenwes; 46, 1975;
- [38] Matsuoka, T., and Sudo, C.; *The Effect of the Strain Path on the Fracture Strain of Steel Sheets*; Sumitomo Res.; 1, 1969;
- [39] Abrantes, J. P.; *Estudo de perfil do dispositivo de expansão hidráulica no software CATIA*; EPUSP, 2002.

8. Anexos



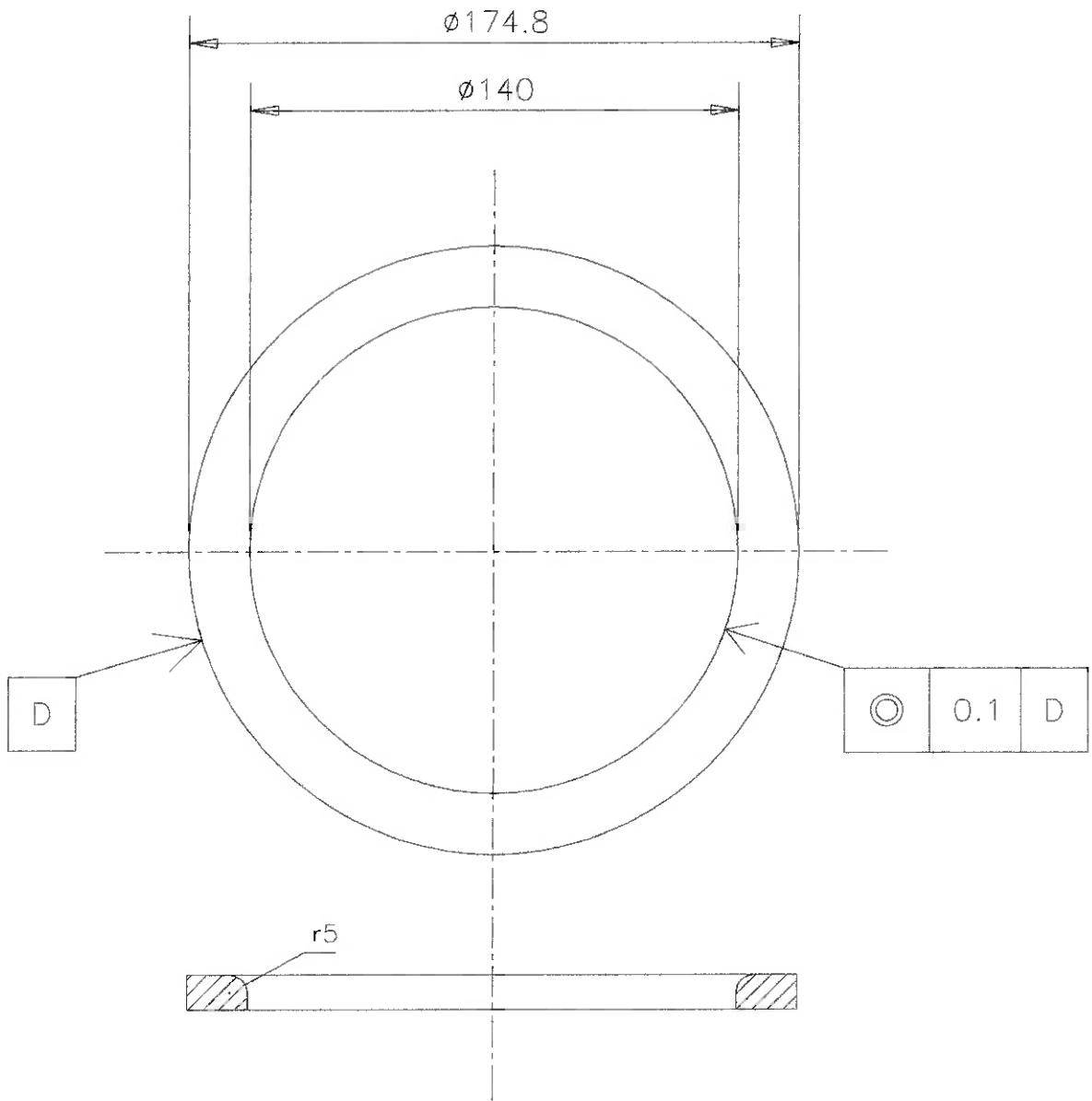
Rugosidade superficial interna e externa : 1,6 (N7)

Tolerância dimensional geral: 0,1mm

Material: aço 1020

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PMC0581 - PROJETO MECÂNICO II

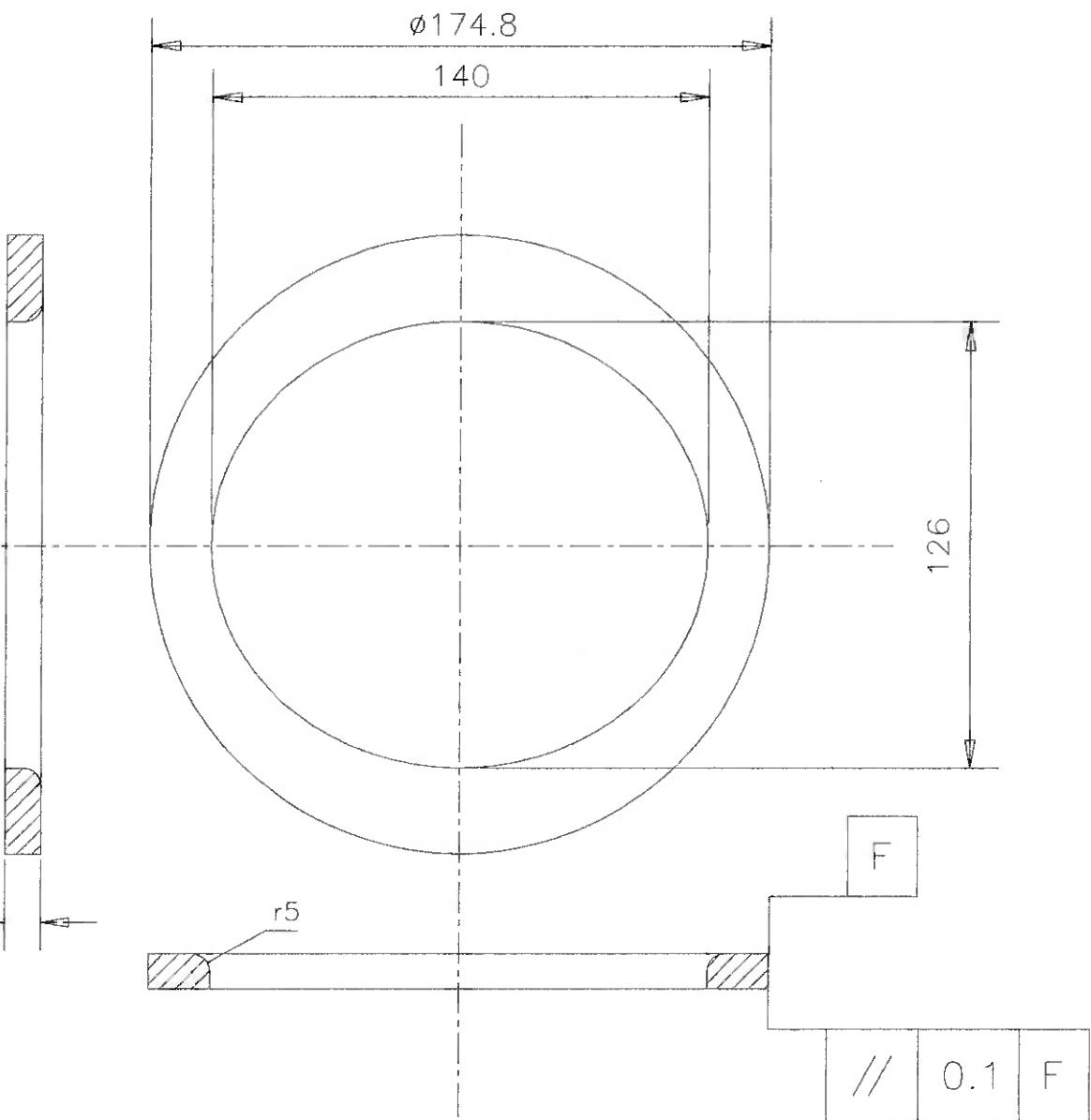
ESCALA: 1:5	DISPOSITIVO DE ENSAIO DE TRAÇÃO BIAXIAL - CORPO	medidas em mm
	Hugo Issoo Terazzaki- 2235187	Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha



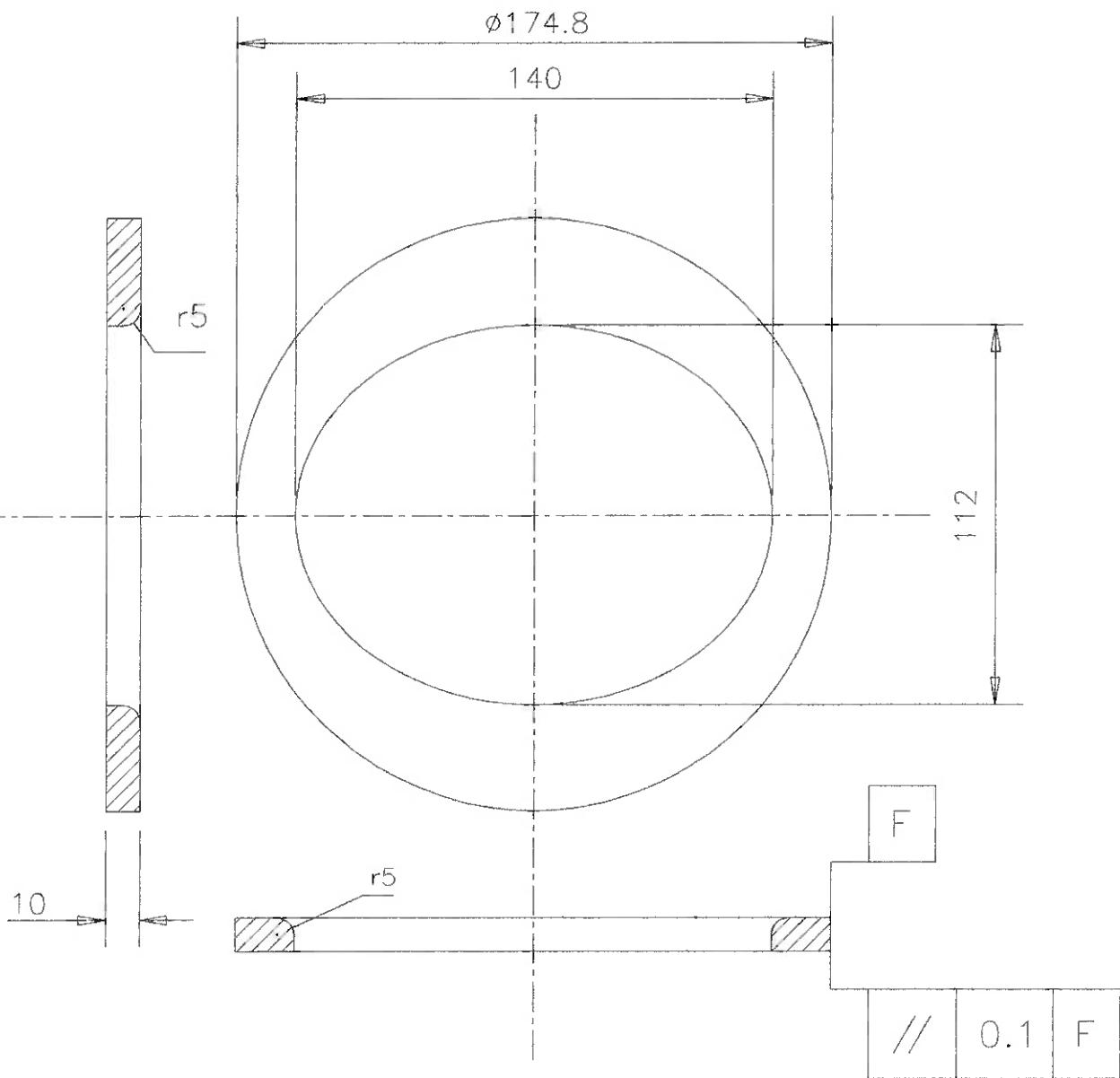
Rugosidade superficial interna e externa : 1,6 (N7)
Tolerância dimensional geral: 0,1mm
Material: aço 1020

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PMC0581 - PROJETO MECÂNICO II

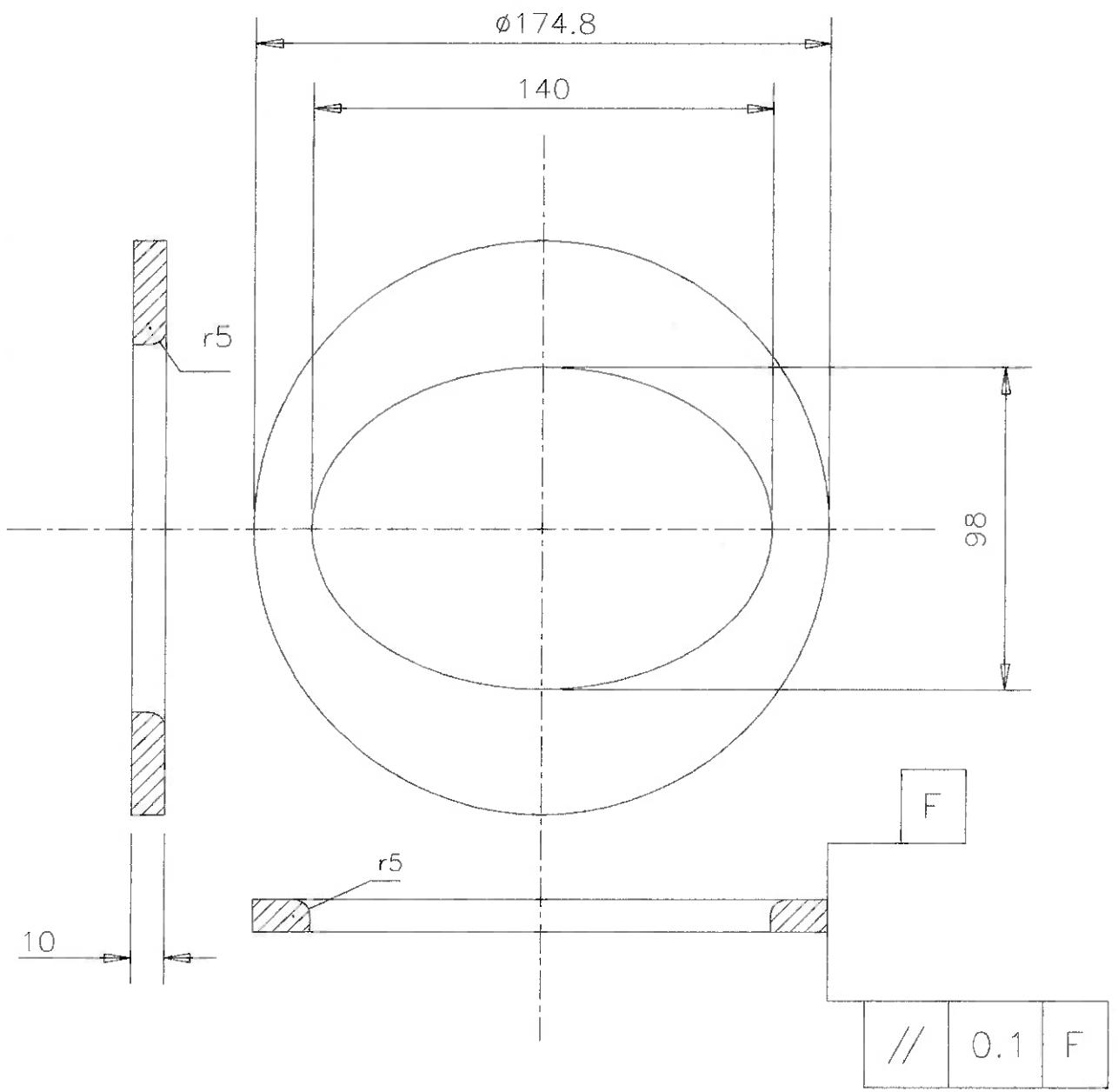
ESCALA: 1:2	DISPOSITIVO DE ENSAIO DE TRAÇÃO BIAXIAL - TAMPA SUPERIOR I	medidas em mm
	Hugo Issoo Terazaki- 2235187	Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha



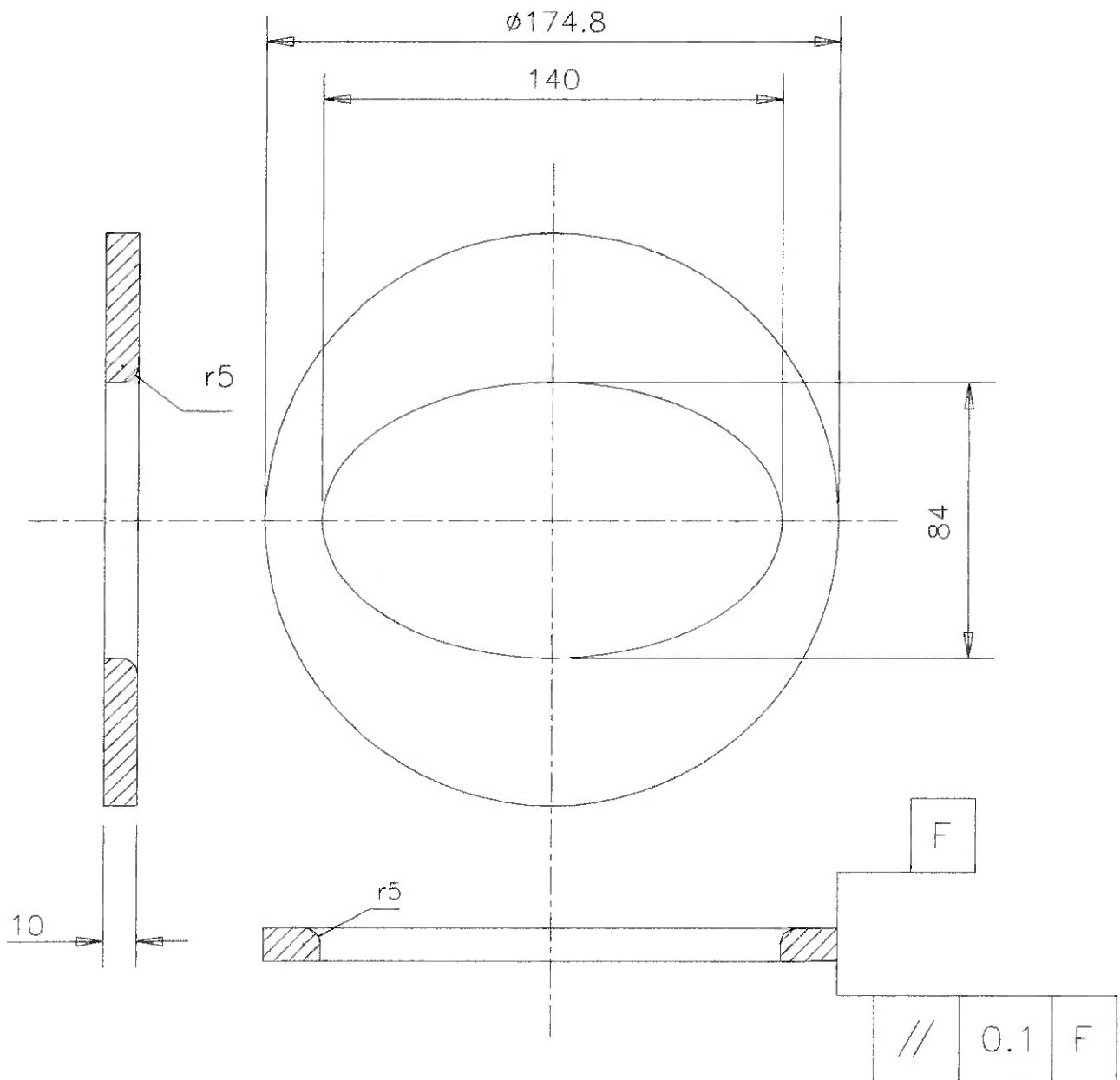
Rugosidade superficial interna e externa : 1,6 (N7)
 Tolerância dimensional geral: 0,1mm
 Material: aço 1020



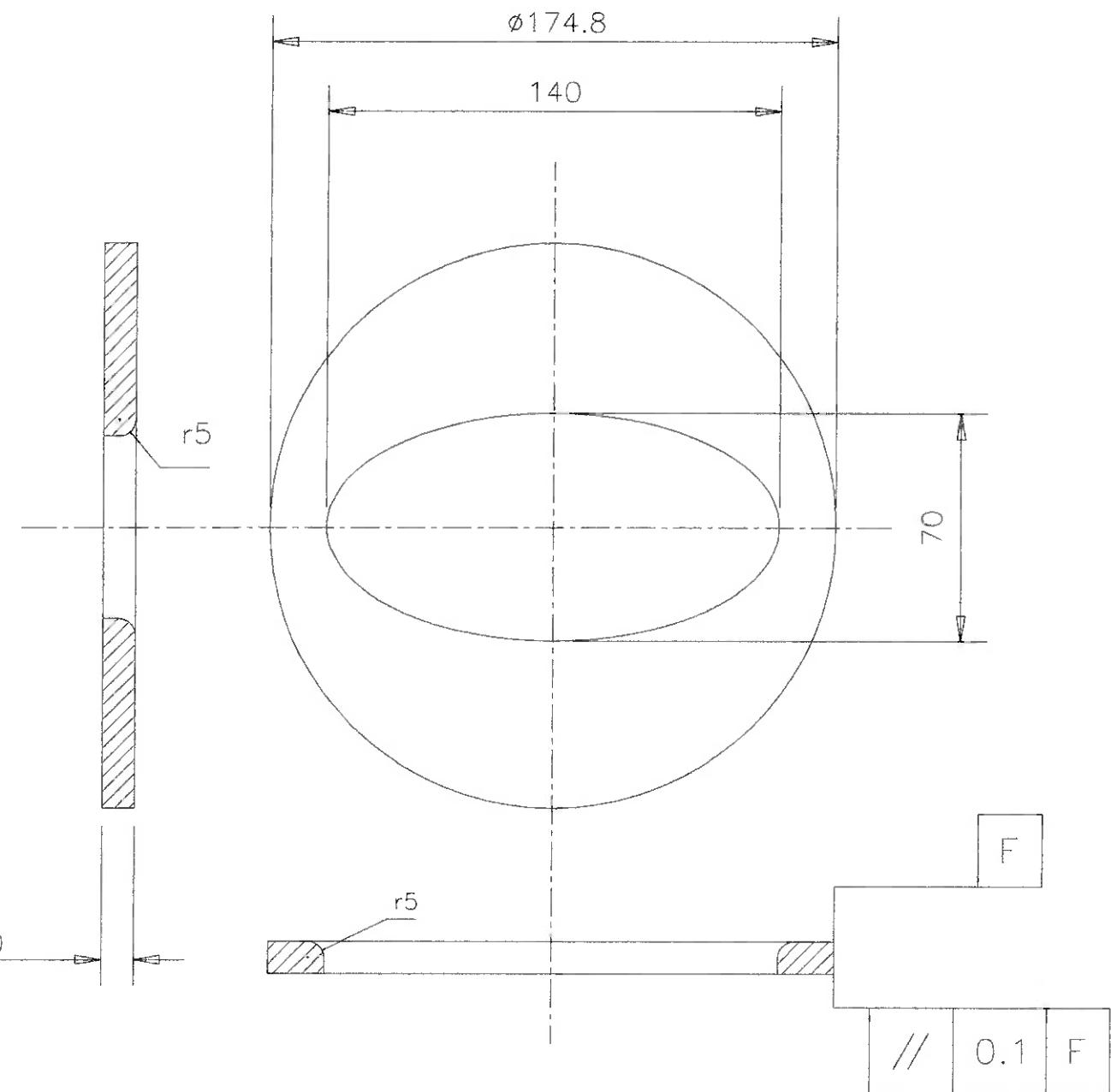
Rugosidade superficial interna e externa : 1,6 (N7)
Tolerância dimensional geral: 0,1mm
Material: aço 1020



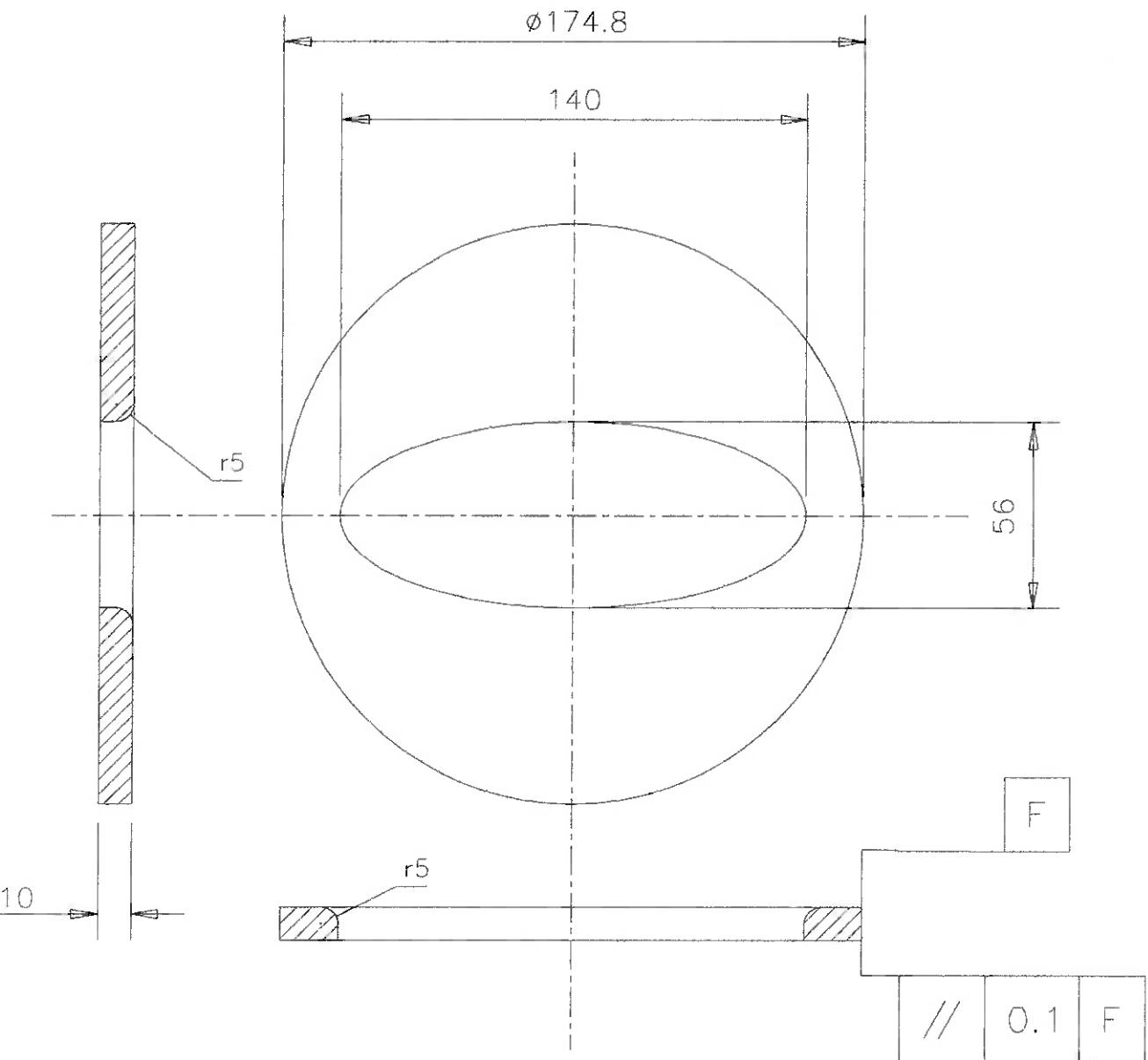
Rugosidade superficial interna e externa : 1,6 (N7)
Tolerância dimensional geral: 0,1mm
Material: aço 1020



Rugosidade superficial interna e externa : 1,6 (N7)
Tolerância dimensional geral: 0,1mm
Material: aço 1020



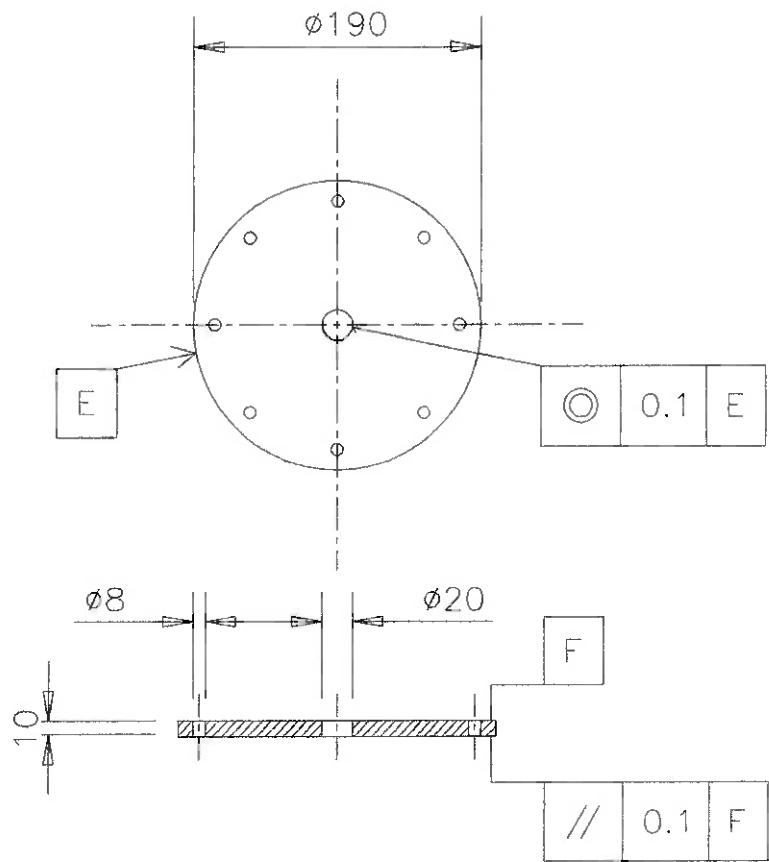
Rugosidade superficial interna e externa : 1,6 (N7)
Tolerância dimensional geral: 0,1mm
Material: aço 1020



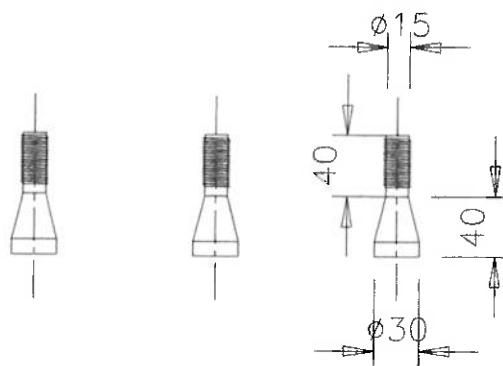
Rugosidade superficial interna e externa : 1,6 (N7)
Tolerância dimensional geral: 0,1mm
Material: aço 1020

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PMC0581 - PROJETO MECÂNICO II

ESCALA: 1:2	DISPOSITIVO DE ENSAIO DE TRAÇÃO BIAXIAL - TAMPA SUPERIOR VII	medidas em mm
	Hugo Isso Terazaki- 2235187	Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha



Rugosidade superficial interna e externa : 1,6 (N7)
Tolerância dimensional geral: 0,1mm
Material: aço 1020



Rugosidade superficial interna e externa : 1,6 (N7)
Tolerância dimensional geral: 0,1mm
Material: 1020

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PMC0581 - PROJETO MECÂNICO II

ESCALA: 1:5	DISPOSITIVO DE ENSAIO DE TRAÇÃO BIAXIAL - PÉS DE SUSTENTAÇÃO	medidas em mm
Hugo Issoo Terazaki- 2235187	Prof. Dr. Glimar Ferreira Batalha	10 / 10