

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

TIAGO SCOPEL

**AVALIAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DO ALUMÍNIO (1100) NO PROCESSO DE
ESTAMPAGEM PROFUNDA**

CAXIAS DO SUL

2014

TIAGO SCOPEL

**AVALIAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DO ALUMÍNIO (1100) NO PROCESSO DE
ESTAMPAGEM PROFUNDA**

Relatório de Estágio II, apresentado a Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico no Curso de Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels

CAXIAS DO SUL

2014


TIAGO SCOPEL

**AVALIAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DO ALUMÍNIO (1100) NO PROCESSO DE
ESTAMPAGEM PROFUNDA**


Relatório de Estágio II, apresentado a
Universidade de Caxias do Sul como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico no Curso de
Engenharia Mecânica.

Aprovado em 17/11/2014


Banca Examinadora



Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Dr. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Me. Sandro Tomaz Martins
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Com o objetivo de definir parâmetros de processo e a geometria do ferramental para a conformação de um Cadinho de Aquecimento Controlado, avaliou-se neste trabalho a estampabilidade de uma chapa de alumínio (1100), de 1,0 mm de espessura, através dos ensaios tecnológicos Swift e Erichsen. Para o Ensaio Swift com lubrificação, obteve-se uma relação de estampagem máxima de $\beta = 2,01$ e, sem lubrificação, $\beta = 1,90$. Já para o Ensaio Erichsen, o Índice Erichsen de Embutimento (IE) com lubrificação foi de $10,2 \pm 0,06$ mm e, sem lubrificação, $9,5 \pm 0,12$ mm. Os valores obtidos para ambos os ensaios tecnológicos foram concordantes com a literatura. Foram obtidos através dos ensaios de tração os índices da curva de escoamento que caracteriza o material ($k_f = 191,24 \cdot \phi^{0,2920}$). Avaliaram-se também o coeficiente de anisotropia normal médio $r_m = 0,62$ e planar $\Delta r = - 0,18$, ambos concordantes com a literatura. Considerando os ensaios tecnológicos, definiu-se a configuração do ferramental que permitirá estampar em um único estágio o componente objeto deste estudo.

Palavras-chave: Estampagem profunda, estampabilidade, Ensaio Swift, Ensaio Erichsen, alumínio.

ABSTRACT

In order to define the process parameters and the tooling geometry of a Controlled Heating Crucible forming, it was evaluated in this report the drawability of an aluminium sheet (1100), with 1,0 mm of thickness, by means of Swift and Erichsen technological tests. For the Swift Test with lubrication, it was obtained a maximum Limiting Drawing Ratio of $\beta = 2,01$ and, without lubrication, $\beta = 1,90$. As for the Erichsen Test, the Index Erichsen (IE) with lubrication was $10,2 \pm 0,06$ mm and, without lubrication $9,5 \pm 0,12$ mm. The values obtained for both technological tests were consistent with the literature. By means of tensile tests index it was possible to obtain the flow curve that characterizes the material ($k_f = 191,24 \cdot \varphi^{0,2920}$). Also it was evaluated the anisotropy value coefficient $r_m = 0,62$ and the flat $\Delta r = - 0,18$, both consistent with literature. Considering the technological tests, it was defined the tooling configuration that will allow draw in a single stage the object component of this study.

Key words: deep drawing, drawability, Swift Test, Erichsen Test, aluminium.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre a variação do coeficiente de anisotropia planar e a formação de ‘orelhas’ na estampagem; a) $\Delta r > 0$, ‘orelhas’ a 0° e 90° , b) $\Delta r \approx 0$, sem ‘orelhas’ e c) $\Delta r < 0$, ‘orelhas’ a 45°	22
Figura 2 – Curva limite de elasticidade x coeficiente de anisotropia normal médio, r_m , em condições de isotropia planar e estado plano de tensão, $\sigma_k=0$.	24
Figura 3 – Deformações em diferentes posições de uma peça estampada	25
Figura 4 – Ferramental utilizado no Ensaio Swift com medidas em mm	27
Figura 5 – Dimensões, em mm, dos componentes para o Ensaio Erichsen	29
Figura 6 – Tipos de deformações que ocorrem na estampagem profunda	32
Figura 7 – Representação da variação de espessura de um copo estampado.....	33
Figura 8 – Copo estampado com flange (com raios de pequeno valor)	38
Figura 9 – Conjunto Termocera.....	40
Figura 10 – Vista isométrica e detalhamento dimensional do componente.....	41
Figura 11 – Ferramenta para o Ensaio Swift modelada no SolidWorks	44
Figura 12 – Ferramenta para o Ensaio Swift finalizada.....	45
Figura 13 – Dispositivo utilizado para o Ensaio Erichsen.....	46
Figura 14 – Forma de extração e embutimento dos corpos-de-prova para a primeira análise metalográfica.....	48
Figura 15 – Microestrutura do corpo-de-prova (A) na imagem à esquerda e, corpo-de-prova (B) na imagem à direita.	49
Figura 16 – Micrografia com a distribuição dos precipitados no alumínio 1100	49
Figura 17 – Microestrutura da superfície plana da chapa com aproximação de 200X na imagem esquerda e 100X na direita.....	50
Figura 18 – Direção de laminação paralela ao padrão impresso na superfície da chapa (riscos)	50
Figura 19 – Gráfico tensão convencional (σ) x deformação relativa (ϵ).....	51
Figura 20 – Gráfico tensão de escoamento (k_f) x deformação verdadeira (ϕ)	52
Figura 21 – Corpos-de-prova gerados em ensaios preliminares.....	54
Figura 22 – ‘Orelhas’ a 45° e 135° em relação à direção de laminação de um dos corpos-de-prova.	55
Figura 23 – Variação de espessura de um corpo-de-prova	55
Figura 24 – Fratura em um corpo-de-prova do ensaio Erichsen.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Diâmetro do disco e profundidade de estampagem h correspondente	28
Tabela 2 –	Resultados dos ensaios experimentais e valor teórico de referência...	30
Tabela 3 –	Composição química da liga 1100.....	41
Tabela 4 –	Propriedades mecânicas da liga 1100.....	41
Tabela 5 –	Quantidade de corpos-de-prova utilizados no ensaio de tração.....	43
Tabela 6 –	Médias dos dados obtidos no Registro de Ensaio de Tração.....	51
Tabela 7 –	Valores obtidos para o IE no Ensaio Erichsen	56
Tabela 8 –	Resultados para a relação de estampagem (β).....	65
Tabela 9 –	Medidas realizadas antes do ensaio de tração	68
Tabela 10 –	Medidas realizadas após o ensaio de tração	68
Tabela 11 –	Médias dos índices de encruamento (n) e das constantes (C) obtidos nas curvas de escoamento.....	71
Tabela 12 –	Dimensões dos corpos-de-prova de seção retangular	72

LISTA DE SIGLAS

CLC	Curva Limite de Conformação
LDR	<i>Limiting Drawing Ratio</i>
IE	Índice Erichsen de Embutimento
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CAC	Cadinho de Aquecimento Controlado

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão [N/mm ²]
E	Módulo de Elasticidade [GPa]
σ_e	Limite de escoamento [N/mm ²]
R_m	Limite de resistência ou Tensão máxima [N/mm ²]
Δl	Alongamento [mm]
F	Força [N]
l_1	Comprimento instantâneo [mm]
l_0	Comprimento inicial [mm]
A_0	Área inicial [mm ²]
ε	Deformação relativa [%]
kf	Tensão de escoamento (tensão x deformação verdadeira) [N/mm ²]
A	Área instantânea [mm ²]
φ	Deformação verdadeira
C	Constante do material
n	Índice de encruamento
r	índice de anisotropia
φ_b	Deformação verdadeira na largura
φ_s	Deformação verdadeira na espessura
b_0	Largura inicial [mm]
s_0	Espessura inicial [mm]
b_1	Largura no instante considerado [mm]
s_1	Espessura no instante considerado [mm]
l_1	Comprimento inicial [mm]
Δ_r	Coefficiente de anisotropia planar
r_m	Coefficiente de anisotropia normal médio
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Deformações verdadeiras nas direções 1, 2 e 3
β	Relação de Estampagem
D_0	Diâmetro da geratriz [mm]
d_p	Diâmetro do punção [mm]
P_{pc}	Pressão exercida pelo prensa-chapas [N/mm ²]
F_1	Força de estampagem no primeiro estágio [N]

k_{fm_1}	Tensão de escoamento média no primeiro estágio [N/mm ²]
r_{cm}	Raio do canto da matriz [mm]
w	Folga entre o punção e a matriz [mm]
s	Espessura da chapa [mm]
d_1	Diâmetro maior do copo estampado [mm]
h_1	Altura total do copo estampado [mm]
β_{adm}	Relação de estampagem admissível
β_{CAC}	Relação de estampagem do Cadinho de Aquecimento Controlado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	Geral	15
1.3.2	Específicos	15
1.4	AMBIENTE DE ESTÁGIO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	ESTAMPABILIDADE DAS CHAPAS.....	17
2.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	18
2.2.1	Curva de Escoamento.....	19
2.2.2	Índice de Anisotropia	20
2.3	CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO.....	24
2.4	ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....	25
2.4.1	Ensaio Swift	26
2.4.2	Ensaio Erichsen	28
2.5	ESTAMPAGEM PROFUNDA	31
2.5.1	Mecânica da Deformação na Estampagem	31
2.5.2	Principais Parâmetros Envolvidos na Estampagem	33
2.5.2.1	Pressão Nominal Exercida pelo Prensa-Chapas.....	33
2.5.2.2	Velocidade de Estampagem.....	34
2.5.2.3	Força de Estampagem	35
2.5.2.4	Atrito e Lubrificação.....	35
2.5.2.5	Raio do Canto do Punção e da Matriz.....	36
2.5.2.6	Folga Entre Punção e Matriz	37
2.5.2.7	Determinação da Geratriz	38
2.5.2.8	Número de Operações Necessárias	39
2.6	PROPRIEDADES DO ALUMÍNIO	39

3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	40
3.1	PEÇA EM ESTUDO	40
3.2	MATERIAL UTILIZADO	41
3.3	ANÁLISE METALOGRAFICA.....	42
3.4	ENSAIO DE TRAÇÃO	42
3.4.1	Curva de Escoamento	43
3.4.2	Índice de Anisotropia	43
3.5	ENSAIO SWIFT	44
3.6	ENSAIO ERICHSEN	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	ANÁLISE METALOGRAFICA.....	48
4.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	51
4.2.1	Curva de Escoamento	52
4.2.2	Índice de Anisotropia	53
4.3	ENSAIO SWIFT	53
4.4	ENSAIO ERICHSEN	56
4.5	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO E A GEOMETRIA DA FERRAMENTA.....	57
4.5.1	Número de Operações Necessárias	57
4.5.2	Determinação da Geratriz	58
4.5.3	Raio do Canto do Punção e da Matriz	58
4.5.4	Diâmetro da Matriz	58
4.5.5	Força de Estampagem e Pressão Exercida pelo Prensa-chapas	59
5	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
	APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO SWIFT PARA DETERMINAÇÃO DO β	65

APÊNDICE B – CÁLCULOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA FERRAMENTA DE ESTAMPAGEM PROFUNDA.....	66
APÊNDICE C – CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNCIDE DE ANISOTROPIA	68
APÊNDICE D – CURVAS DE ESCOAMENTO OBTIDAS NOS GRÁFICOS PARA OS SEIS CORPOS-DE-PROVA	70
APÊNDICE E – CÁLCULOS DAS MÉDIAS PARA DEFINIÇÃO DA CURVA DE ESCOAMENTO DO ALUMÍNIO 1100.....	71
ANEXO A – CORPO-DE-PROVA DE SEÇÃO RETANGULAR PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO	72
ANEXO B – CORPO-DE-PROVA PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ANISOTROPIA	73

1 INTRODUÇÃO

Amplamente utilizado para a fabricação de componentes com destino aos diversos ramos industriais como a indústria automotiva, máquinas agrícolas, aeroespacial, utensílios domésticos, construção civil, medicina, transportes e indústria eletroeletrônica, o processo de fabricação envolvendo a conformação de chapas metálicas tem sua origem através da matéria-prima oriunda do processo de laminação (SCHAEFFER, 2004).

Alguns dos fatores decisivos que fazem com que o processo de estampagem seja preferencial pelas indústrias transformadoras é o bom acabamento superficial aliado ao reduzido custo de produção. Caracterizado também pela elevada produtividade, segundo Rodrigues e Martins (2010), dependendo da complexidade e dimensões das peças a serem produzidas, a produção média utilizando o processo de estampagem pode facilmente atingir a ordem das 5000 peças/hora.

A estampagem de chapas metálicas pode ser definida como um processo tecnológico de transformação de chapas, onde através da ação de um prensa-chapas e de um punção, a geratriz (*blank*) é forçada a escoar controladamente para o interior de uma matriz, originando uma peça oca com pouca variação na espessura em relação ao seu valor inicial (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Segundo Schaeffer (2006, p. 31), “a estampagem, apesar de ser um processo de fabricação bastante antigo, requer a observação cuidadosa de parâmetros técnicos para obtenção de peças de boa qualidade”.

Lora (2009) apresenta que as propriedades mecânicas inerentes aos materiais das chapas são obtidas por ensaios tradicionais, como o ensaio de tração e, que através de ensaios específicos para o processo de manufatura pelas quais os materiais irão passar, é possível obter-se algumas propriedades tecnológicas como a máxima deformação aceitável do material em um processo de estampagem profunda.

Em vista disso, este trabalho visa avaliar a estampabilidade do alumínio (1100) na estampagem profunda, através de dois ensaios tecnológicos (Ensaio Swift e Ensaio Erichsen) e ensaios de tração, com o propósito de definir os parâmetros do processo e a geometria da ferramenta de conformação de um Cadinho de Aquecimento Controlado.

1.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A Dompel Indústria Plástica e Metalúrgica Ltda iniciou suas atividades em 16 de outubro de 1980, inicialmente, com a fabricação de rolos e prendedores para cabelos, ambos injetados em polímero. Com o mercado direcionado para salões de beleza, em 1988 iniciou-se a venda de seus mais de 300 acessórios para São Paulo e Rio de Janeiro, expandindo-se para todos os estados do Brasil e MERCOSUL.

Em 2001 a empresa mudou-se para o bairro Cristo Redentor, para um prédio com mais de 4.000 m² de área construída, repassando toda a gama de acessórios a um de seus prestadores de serviços (franquia) em 2009. Atualmente dedica-se somente à produção de móveis para salões de beleza como cadeiras, revisteiros, bancadas, cirandinhas, tripés, carrinhos, lavatórios, estantes, expositores de esmaltes, maletas, organizadores, bacias, entre outros.

Para a fabricação de seus produtos, a Dompel conta com designer externo; engenharia própria; matrizaria para fabricação dos moldes; injeção em polímero do seu próprio produto; prensas hidráulicas; máquinas automatizadas para curvar tubos, cortar madeiras e injeção de poliuretano. A empresa está localizada no bairro Diamantino, Caxias do Sul – RS desde 2012, e conta com um quadro de aproximadamente 140 colaboradores e uma área de 11.000 m² de área construída em uma área total de 28.000 m².

Como a atividade principal da empresa, de um modo geral, é a fabricação de produtos injetados em polímeros, o conhecimento na área de conformação de chapas metálicas deverá ser desenvolvido devido à crescente gama de produtos que utilizam este processo.

Atualmente, as ferramentas de conformação e corte de chapas metálicas já fabricadas na empresa caracterizam-se pela simplicidade, ou seja, estas ferramentas foram projetadas e construídas com bases práticas, onde depois de testadas, muitas vezes voltam para o setor da matrizaria para novas alterações, acarretando em uma perda excessiva no tempo de desenvolvimento do projeto de um novo produto.

Tendo como principal objetivo a satisfação dos clientes e buscando conhecer as suas necessidades, aliando custo benefício à qualidade, a Dompel mantém-se atualizada com as novas tendências do mercado, visando sempre excelência nos resultados e ética em todas as suas ações.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o lançamento de um novo produto de maior complexidade, a empresa necessitará buscar conhecimento para desenvolver o projeto de uma ferramenta de estampagem, minimizando as operações típicas de tentativa e erro. Neste sentido, visualiza-se uma oportunidade de efetuar um estudo na área da conformação mecânica, a fim de garantir a qualidade no produto final, atendendo às necessidades da empresa e dos clientes.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

- Avaliar a estampabilidade do alumínio (1100) no processo de estampagem profunda.

1.3.2 Específicos

- Efetuar levantamento bibliográfico.
- Realizar ensaios para determinar:
 - A relação de estampagem.
 - Índice Erichsen de Embutimento.
 - Índice de anisotropia.
 - Índice de encruamento.
- Definir os parâmetros do processo e a geometria da ferramenta de estampagem profunda.
- Comparar os resultados obtidos com a literatura.

1.4 AMBIENTE DE ESTÁGIO

A criação de um novo projeto na empresa geralmente envolve a direção, o designer externo e o supervisor de engenharia/matrizaria. O conjunto Termocera consiste em um dispositivo de aquecimento para derreter cera, utilizado para depilação em salões de beleza. Este conjunto é composto por diversos

componentes, entre eles um Cadinho de Aquecimento Controlado, produzido através da conformação mecânica e utilizando como matéria-prima o alumínio 1100.

Neste sentido, foi necessário definir os parâmetros envolvidos no processo e a geometria da ferramenta, levando em conta os limites de conformação do material. O conhecimento adquirido neste projeto poderá ser utilizado em outros futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas as propriedades mecânicas obtidas através de ensaios tecnológicos, a fim de avaliar a estampabilidade do material durante o processo de conformação mecânica. Será feita também uma análise do processo de estampagem profunda, caracterizando os parâmetros que influenciam neste processo.

2.1 ESTAMPABILIDADE DAS CHAPAS

Para auxiliar na avaliação das características de estampabilidade das chapas, parâmetros como o índice de encruamento, índice de anisotropia, limite de resistência, alongamento e tensão de escoamento são utilizados para analisar o grau de conformabilidade ao qual o material será submetido durante o processo de fabricação (TIGRINHO, 2005).

Segundo Schaeffer (2004), a caracterização da estampabilidade das chapas pode ser verificada utilizando alguns dos principais testes citados abaixo:

- Ensaio de tração, onde propriedades mecânicas como tensão de escoamento, tensão máxima, módulo de elasticidade e alongamento máximo, são obtidos através da curva tensão x deformação.

- A curva de escoamento, que fornece o índice de encruamento do material, importante indicador das características de encruabilidade do material, onde também pode ser obtida através do ensaio de tração.

- O índice de anisotropia, que está relacionado com as diferentes direções de laminação utilizadas na sua produção, influenciando nas propriedades do material e nos efeitos do processo de conformação.

- A curva limite de conformação, que permite relacionar as máximas deformações que o material pode atingir antes do seu rompimento, de acordo com as três principais direções de deformação com o limite máximo de deformação.

- Os testes tecnológicos, utilizados para determinar o comportamento dos materiais no processo de conformação, evitando defeitos em geometrias de maior complexidade.

- Os testes utilizados para determinar o coeficiente de atrito, que informam o efeito lubrificante de alguns produtos utilizados no processo de conformação.

2.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Por se tratar de um ensaio relativamente simples e de rápida execução, o ensaio de tração é um dos mais utilizados na indústria de componentes mecânicos quando se necessita de uma avaliação das propriedades mecânicas do material (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

Schaeffer (2004) apresenta que as propriedades obtidas através do ensaio de tração são: módulo de elasticidade (E), tensão de escoamento ($\sigma_{0,2}$ ou σ_e), limite de resistência ou tensão máxima (R_m) e alongamento (Δl).

O ensaio consiste em tracionar um corpo-de-prova, de forma a garantir um estado uniaxial de tensão, com força e velocidade constante até a ruptura, registrando a força (F) e o comprimento (l_1) em cada instante (SCHAEFFER, 2004).

O cálculo da tensão convencional (σ) é obtido dividindo-se a força (F) pela área inicial (A_0) da seção transversal. A partir dos comprimentos (l_1), obtidos em cada instante e, do comprimento inicial do corpo-de-prova (l_0), calcula-se a deformação relativa (ε) através da Equação 1 (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (1)$$

Souza (1982) apresenta que, inicialmente o material encontra-se dentro de sua zona elástica, ou seja, qualquer ponto dentro desta região que antecede a zona plástica obedece à Lei de Hooke (Equação 2), a qual indica que se a carga for aliviada dentro desta região, o material volta à origem sem apresentar nenhuma deformação residual ou permanente.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Após a zona elástica inicia-se a zona plástica, isto é, a tensão e a deformação não se relacionam mais através da simples constante de proporcionalidade, se houver um descarregamento do material até tensão igual a zero, haverá uma deformação permanente ou residual (SOUZA, 1982).

O início da plasticidade pode ser verificado através do fenômeno de escoamento, principalmente em metais e ligas dúcteis, que se caracteriza pelo

aumento relativamente grande da deformação com uma pequena variação da tensão (FERRARINI, 2004).

O início da estricção do corpo de prova leva ao rompimento do mesmo, devido ao fato de que não se possui mais um estado uniaxial de tensões (FERRARINI, 2004).

2.2.1 Curva de Escoamento

Para descrever o comportamento do material no regime plástico, a curva de escoamento é avaliada como um dado fundamental para a execução de simulações e cálculos de esforços e energia (BOFF et al., 2012).

O encruamento decorre da necessidade de aumentar-se a tensão para dar continuidade à deformação plástica do material, utilizando para isto uma energia cada vez maior (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

A fim de realizar uma simulação numérica do processo ou para estimar a força necessária para a fabricação de uma peça, muitos casos necessitam de uma representação matemática do comportamento mecânico do material (FERRARINI, 2004).

Desta forma, Schaeffer (2004) apresenta que a variação da tensão de escoamento (k_f) que um determinado material apresenta durante uma deformação a frio ou a quente é obtida entre a razão da medição da força (F) e a área instantânea (A). Segundo Garcia, Spim e Santos (2000), a área instantânea também pode ser representada pela divisão entre a área inicial (A_0) e a deformação relativa acrescida de uma unidade ($1+\epsilon$). O cálculo da deformação verdadeira (φ) pode ser efetuado através da Equação 3.

$$\varphi = \ln(1 + \epsilon) \quad (3)$$

Conforme Schaeffer (2004), as curvas de escoamento obtidas experimentalmente, geralmente na deformação a frio, apresentam-se conforme a Equação 4. Segundo Ferrarini (2004), uma forma geral para representar as curvas de escoamento é através da equação de Hollomon (Equação 4), em que C é uma constante do material.

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (4)$$

Segundo Souza (1982), o índice de encruamento (n) indica a medida da capacidade ou da habilidade que o material tem para distribuir a deformação uniformemente, principalmente aos metais submetidos à estampagem. O índice de encruamento determina as características de encruabilidade do material, maior será a encruabilidade do material quanto maior for o índice de encruamento (SCHAEFFER, 2004). De acordo com Otomar (2010), o índice de encruamento (n) define a variação da tensão para cada incremento de deformação. O autor citado apresenta que, para um elevado valor de “ n ”, o material apresentará maior dureza e maior resistência à estrição.

Para obtenção do índice de encruamento (n), os dados da tensão de escoamento (k_f) e da deformação verdadeira (φ) são transferidos para um diagrama em escala logarítmica, o valor de “ n ” é dado pela inclinação da reta tangente à curva (SCHAEFFER, 2004).

De acordo com Siegert e Wagner (2010), os valores do índice de encruamento (n) para ligas de alumínio podem variar de 0,22 a 0,31. Ensaios realizados por Ferrarini (2004) para uma liga de alumínio 3104, apresentaram um valor de “ n ” igual a 0,233.

2.2.2 Índice de Anisotropia

Geralmente, o comportamento anisotrópico das chapas está relacionado com os tratamentos térmicos posteriores usados na produção e com as técnicas de laminação (RODRIGUES; MARTINS, 2010). Segundo Schaeffer (2004), o fenômeno de ‘orelhamento’ nos processos de estampagem profunda de chapas metálicas ocorre, pois a deformação da microestrutura causada durante o processo de laminação origina grãos mais alongados na direção da laminação, o que provoca uma heterogeneidade nas propriedades das chapas.

A determinação do índice de anisotropia (r) é realizada através de ensaios onde, normalmente, mede-se a largura em duas ou três posições diferentes do corpo-de-prova, efetuando-se, em seguida, os cálculos com um valor médio das larguras (SCHAEFFER, 2004). O mesmo autor apresenta que o índice de

anisotropia (r), pode ser obtido através da razão entre as deformações principais na direção da largura (φ_b) e a deformação na espessura (φ_s), conforme Equação 5.

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{b_0 \cdot l_0}{b_1 \cdot l_1}\right)} \quad (5)$$

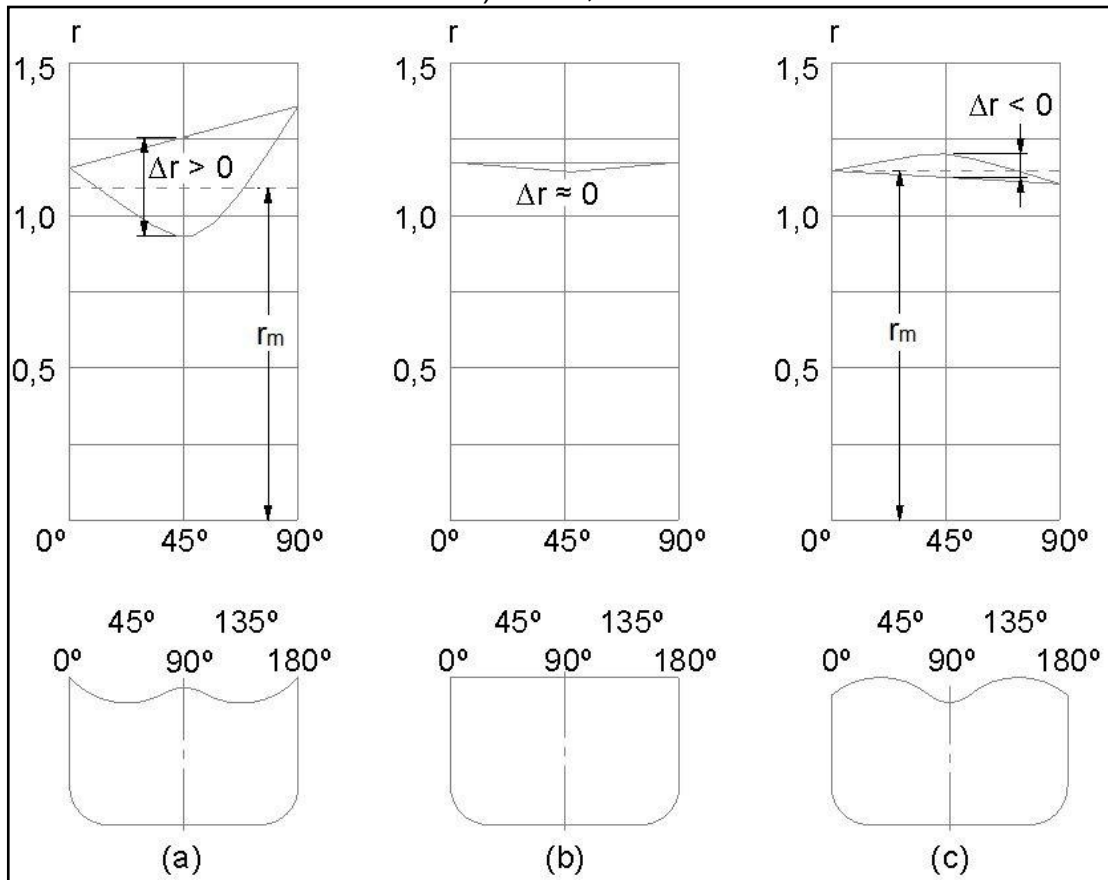
Onde, b_1 e s_1 são, respectivamente, a largura e a espessura no instante considerado. A largura, a espessura e o comprimento inicial são, respectivamente, b_0 , s_0 e l_0 e, por fim, l_1 é o comprimento final.

Segundo Schaeffer (2004), para materiais isotrópicos ($r = 1$), tem-se que as propriedades mecânicas são iguais em todas as direções, para materiais anisotrópicos em que $r > 1$ a diminuição na espessura é menor que a diminuição na largura. Novotny e Hein (2001 apud SCHAEFFER, 2004) demonstram que materiais com $r < 1$ não apresentam boa estampabilidade, devido ao fato de que uma deformação na espessura será maior que na largura, para uma mesma solicitação mecânica.

Rodrigues e Martins (2010) apresentam que chapas laminadas basicamente apresentam dois tipos de anisotropia: a anisotropia planar e a normal. Os autores citados consideram que a anisotropia planar consiste na variação das propriedades mecânicas no plano da chapa, na direção em que são medidas, enquanto que a anisotropia normal acontece quando as propriedades segundo a espessura são diferentes das obtidas no plano da chapa.

Torna-se desejável que o material utilizado na estampagem não apresente variação do coeficiente de anisotropia planar, $\Delta r \approx 0$, mantendo-se constante no plano da chapa qualquer que seja a direção considerada, evitando a formação de 'orelhas' conforme pode ser visto na Figura 1 (b). Como nem sempre o valor do coeficiente de anisotropia é constante no plano da chapa, a Figura 1 (a) e (c) apresentam em termos genéricos quatro máximos para o coeficiente de anisotropia, igualmente espaçados de 90° , em um ângulo de rotação de 360° no plano da chapa (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Figura 1 – Relação entre a variação do coeficiente de anisotropia planar e a formação de ‘orelhas’ na estampagem; a) $\Delta r > 0$, ‘orelhas’ a 0° e 90°, b) $\Delta r \approx 0$, sem ‘orelhas’ e c) $\Delta r < 0$, ‘orelhas’ a 45°



Fonte: Adaptado de Rodrigues e Martins (2010)

O mecanismo de formação das ‘orelhas’ pode ser compreendido considerando que, as direções em que a chapa oferece maior resistência a variações de espessura são simultaneamente as direções em que os valores do coeficiente de anisotropia normal são mais elevados. Desta forma, a deformação na direção tangencial deixa de ser uniforme durante a estampagem da aba, deformando menos nas zonas de coeficientes de anisotropia normal mais elevados e deformando mais nas zonas onde os coeficientes de anisotropia normal são reduzidos, formando-se assim as ‘orelhas’ como forma de compensar o deslocamento radial do material na aba (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Para indicar o coeficiente de anisotropia planar, Rodrigues e Martins (2010) consideram a Equação 6 como referência.

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (6)$$

De acordo com Rodrigues e Martins (2010), a Equação 7 quantifica o coeficiente de anisotropia normal médio, segundo a direção da espessura.

$$r_m = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + r_{90^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ}) \quad (7)$$

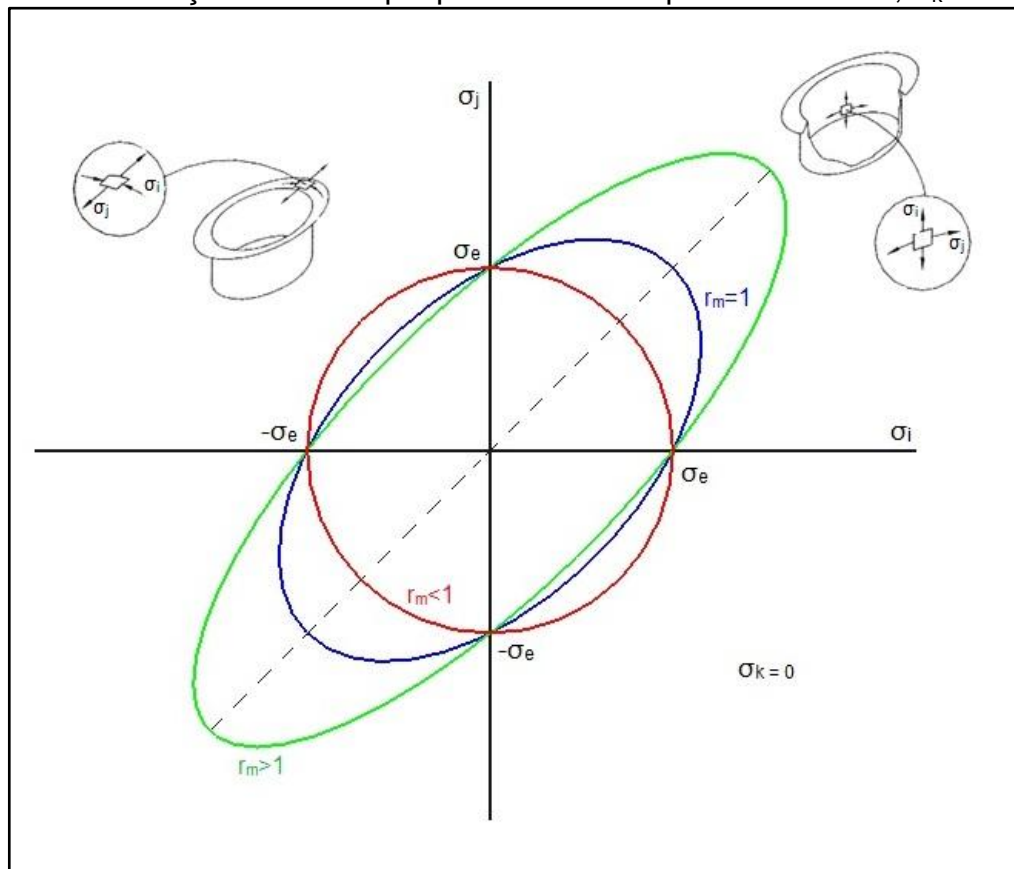
Em que r_{0° , r_{45° e r_{90° são, respectivamente, o coeficiente de anisotropia paralelo à direção de laminação, à 45° da direção de laminação e perpendicular à direção de laminação.

Segundo Siegert e Wagner (2010), o índice de anisotropia (r) para ligas de alumínio pode variar de 0,56 a 0,85. Rodrigues e Martins (2010) apresentam que, o coeficiente de anisotropia normal médio r_m para a estampagem do alumínio pode variar de 0,5 a 1,0.

Considerando o processo de estampagem em condições de isotropia planar e estado plano de tensão, as zonas do fundo e do canto do punção apresentam elevados valores do coeficiente de anisotropia, r_m , indicando uma elevada resistência à diminuição da espessura da chapa e, portanto, uma resistência maior à deformação para estados biaxiais de tração. Para valores reduzidos de r_m , uma menor resistência mecânica será exigida, conseqüentemente, uma diminuição da espessura será facilitada. Assim, no caso da estampagem, a existência de isotropia planar ajuda a reduzir os defeitos de forma, principalmente na zona da aba. Já o estado de anisotropia ($r_m > 1$) garante que maiores reduções de perímetro na geratriz, sem maiores riscos de fratura da peça, podem ser alcançados (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Desta forma, uma análise da Figura 2 demonstra que, na deformação plástica da aba os valores das tensões radiais e tangenciais diminuem quando r_m aumenta (2º quadrante), enquanto que para deformar plasticamente a zona mais crítica, transição do canto do cunho para a zona cilíndrica, os valores das mesmas tensões aumentam (1º quadrante). Conclui-se assim que, a região onde menores resistências à deformação plástica acontecem é na zona da aba, e a região onde o material oferece maior resistência para a conformação é na zona crítica (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Figura 2 – Curva limite de elasticidade x coeficiente de anisotropia normal médio, r_m , em condições de isotropia planar e estado plano de tensão, $\sigma_k=0$



Fonte: Adaptado de Rodrigues e Martins (2010)

2.3 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

Segundo Dieter (1981), uma das formas para controlar as falhas mecânicas nos processos de conformação de chapas metálicas é utilizando a CLC (Curva Limite de Conformação). Schaeffer (2004) apresenta que, através da combinação das deformações principais (φ_1 , φ_2 e φ_3) que ocorrerão no processo de fabricação, a CLC é capaz de informar se tais combinações poderão originar peças defeituosas ou não.

As medidas das deformações são realizadas através do emprego de grades impressas sobre a chapa (geratriz) antes de ocorrer a estampagem. Ao término do processo, as deformações são avaliadas nas áreas críticas efetuando-se as medições na grade impressa e, em seguida, calculam-se as três deformações principais (φ_1 , φ_2 e φ_3) (SCHAEFFER, 2004).

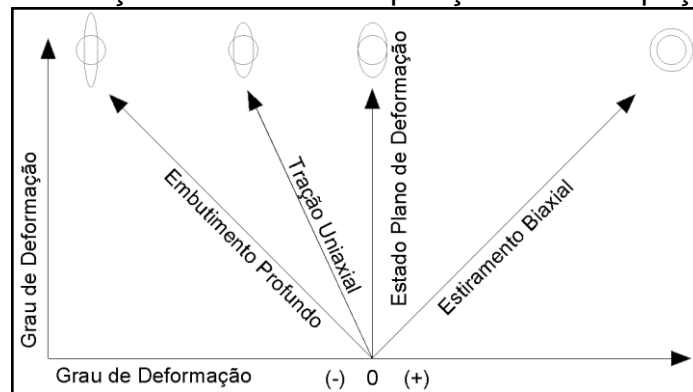
Rodrigues e Martins (2010) apresentam que, para obtenção da CLC, podem ser utilizados ensaios Nakazima. O ensaio consiste em deformar chapas metálicas

retangulares, variando-as na largura, através de um punção semi-esférico, de uma matriz e de um prensa-chapas (NAKAZIMA, 1968 apud BASTOS, 2009).

As direções das duas deformações principais na estampagem são representadas pelos eixos máximo e mínimo de uma elipse. Estas deformações são comparadas com o diagrama de Keeler-Goodwin para o material em questão, representando que os estados de deformações situados acima da curva ocasionam a ruptura da chapa, contrário aos situados abaixo da curva (DIETER, 1981).

Segundo Schaeffer (2004), as deformações que ocorrem na malha impressa podem ser classificadas em função das solicitações que ocorrem durante a estampagem, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Deformações em diferentes posições de uma peça estampada



Fonte: Adaptado de Schaeffer (2004)

2.4 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

Para avaliar ou até mesmo para estimar a capacidade de conformação de materiais metálicos na etapa de produção, ou para determinar e validar uma CLC, utilizam-se ensaios tecnológicos, a fim de prever o comportamento de determinado material durante o processo de conformação (SCHAEFFER, 2004).

Segundo Garcia, Spim e Santos (2000), os testes simulativos, além do Ensaio Swift e do Ensaio Erichsen que são tratados neste trabalho, utilizados para a avaliação da estampabilidade de chapas são:

- Ensaio Olsen: Através de um punção esférico, a chapa é forçada contra uma matriz, onde o prensa-chapas evita que a mesma deslize para o interior da matriz. Mede-se continuamente a carga e a profundidade de estampagem, quando a carga começa a diminuir é determinada a profundidade da calota obtendo como resultado o índice de ductilidade.

- Ensaio Fukui: Consiste na conformação de um disco metálico como um cone com vértice esférico, forçando o disco para o interior de uma matriz através de um punção hemisférico.

Através do estudo do Ensaio Erichsen e do Ensaio Swift é possível caracterizar o comportamento mecânico do material frente às solicitações envolvidas no processo de conformação, cobrindo a faixa de deformações de estiramento até estampagem profunda (NETTO, 2004). Em um processo de conformação de chapa, segundo Souza (1982), dificilmente tem-se apenas estiramento ou embutimento, sempre há uma combinação dessas duas operações com outras (dobramento, corte, etc.).

2.4.1 Ensaio Swift

Na estampagem profunda, a verificação da Relação de Estampagem (β) ou do LDR (*Limiting Drawing Ratio*) é realizada para medir a capacidade de estampagem de um determinado material, sendo que entre os diversos ensaios existentes, o Ensaio Swift é o mais aceitável para a estampagem profunda, capaz de simular as condições de produção e assegurar que as diversas variáveis envolvidas podem ser repetidas (PINHEIRO; RODRIGUES; ABRÃO, 2010).

Este método de ensaio consiste em forçar um punção na forma cilíndrica de fundo plano contra um disco metálico (*blank*) para o interior de uma matriz, provocando o embutimento do material. São utilizados discos circulares de vários diâmetros, onde o resultado é obtido através da razão entre o maior diâmetro de disco e o diâmetro do punção, em que o processo de estampagem foi efetuado com sucesso, sem que tenha ocorrido a ruptura ou falhas superficiais da peça (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

Segundo Dieter (1981), a maior parte dos estudos experimentais e teóricos utilizados na estampagem profunda têm sido realizados com base no Ensaio Swift, demonstrando que a relação de estampagem pode ser obtida através da Equação 8.

$$\beta = \text{LDR} = \frac{D_0}{d_p} \quad (8)$$

Onde D_0 e d_p são, respectivamente, diâmetro do *blank* e diâmetro do punção. Siegert e Wagner (2010) explicam que para pequenos valores do índice de

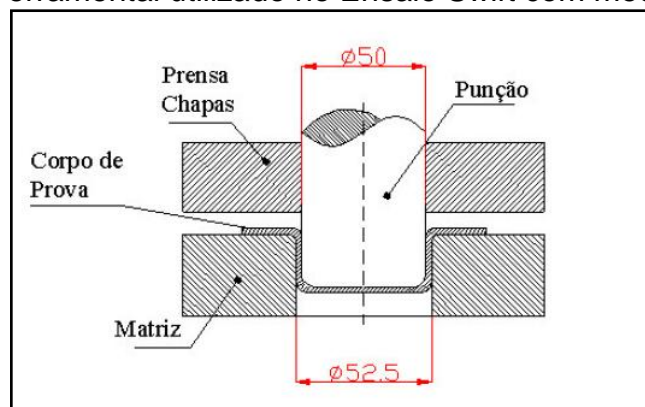
anisotropia (r), pequenos valores de β são esperados, conseqüentemente, elevados valores de “ r ” resultam em elevados valores de β .

Rodrigues e Martins (2010) apresentam que os valores de β para o alumínio podem variar de 1,67 a 1,89 para a primeira operação de estampagem. Segundo Siegert e Wagner (2010), a relação de estampagem (β) para ligas de alumínio pode apresentar variações de 2,08 a 2,1.

Schaeffer (2004) explica que, além da matriz e do punção, o prensa-chapas também é necessário neste ensaio a fim de diminuir o enrugamento. Segundo Garcia, Spim e Santos (2000), a função do prensa-chapas consiste em evitar que o enrugamento seja transferido para o interior da matriz, formando e propagando trincas que poderão romper lateralmente o copo. Netto (2004) ressalta que a função do prensa-chapas consiste apenas em diminuir o enrugamento do material e não impedir o movimento do material para o interior da matriz.

De acordo com Siegert e Wagner (2010) e Pinheiro et al. (2013), não existe uma norma técnica específica que padroniza o Ensaio Swift assim, Folle (2012) apresenta na Figura 4 abaixo a folga ideal entre o punção e a matriz para a estampagem de uma chapa de alumínio de 1,0 mm de espessura. Além disso, Pinheiro, Rodrigues e Abrão (2010) indicam que os raios do punção e da matriz devem ser de 6,35 mm.

Figura 4 – Ferramental utilizado no Ensaio Swift com medidas em mm



Fonte: Renó (1985) apud Netto (2004)

Verma e Chandra (2006) consideram o Ensaio Swift como o método mais comum para determinar o β de um determinado material, no entanto relatam que os experimentos podem ser demorados. Conforme Pinheiro et al. (2013), devido ao fato que a determinação do coeficiente β é feita através de sucessivos testes, onde o

diâmetro dos discos são aumentados até a ocorrência da falha, o ensaio pode ser otimizado caso já se possua uma estimativa inicial de diâmetro de disco. Ainda segundo Pinheiro et al. (2013), na maioria dos ensaios utilizam-se de 6 a 10 discos, com incrementos de 1,0 mm no diâmetro.

Ferrarini (2004) apresenta outra forma para determinar a relação de estampagem (β), através da razão entre o máximo diâmetro de disco e o diâmetro do punção, em que se atingiu a altura h especificada na Tabela 1 sem que tenha rompido a chapa. A Tabela 1 apresenta os diâmetros dos discos sugeridos, iniciando com 80,00 mm até 115,00 mm, com variações de 5,00 mm. A altura h corresponde à profundidade de embutimento sugerida para cada diâmetro de disco.

Tabela 1 – Diâmetro do disco e profundidade de estampagem h correspondente

Diâmetro do disco (mm)	80	85	90	95	100	105	110	115
Profundidade h (mm)	15	20	25	30	35	40	45	50

Fonte: Borsoi; Hening; Schaeffer (2000) apud Ferrarini (2004)

Pinheiro, Rodrigues e Abrão (2010) apresentam que, a fim de garantir uma padronização dos resultados para o Ensaio Swift, têm-se:

- A superfície e o raio de canto da matriz devem ser polidos, garantindo baixa rugosidade;
- Deve haver uma lubrificação nas interfaces (prensa-chapas/*blank*) e (prensa-chapas/matriz);
- O punção deve estar totalmente limpo e isento de lubrificação.

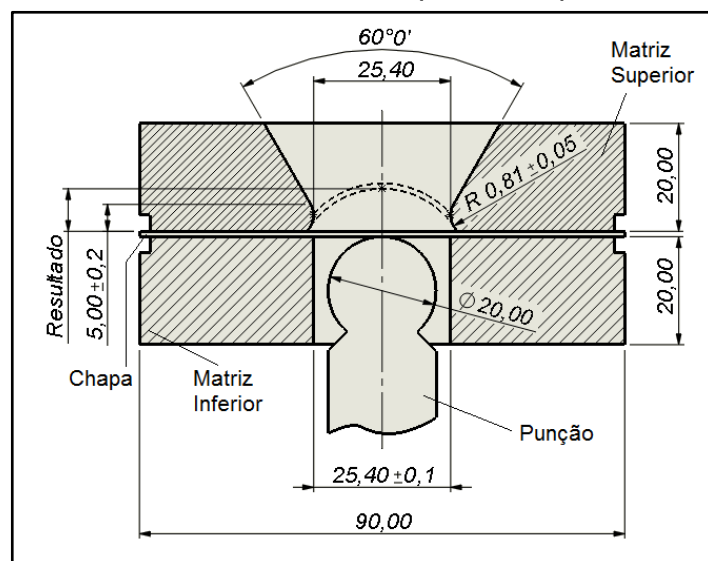
2.4.2 Ensaio Erichsen

O Ensaio Erichsen é utilizado para determinar a ductilidade de chapas metálicas. Deformações trativas bidimensionais ocorrem neste ensaio e, havendo condições de lubrificação controladas, ocorre deformação biaxial. O corpo-de-prova se deforma igualmente em módulo e direção, caracterizando o estiramento (SCHAEFFER, 2004).

Segundo Souza (1982), o processo de estiramento consiste em reduzir a espessura de uma chapa através da ação de um punção de cabeça esférica contra uma matriz, onde o prensa-chapas impede que o material deslize para dentro da

matriz. Segundo Tigrinho (2005), mesmo a pressão no prensa-chapas sendo elevada, a ausência de saliências que impedem o deslizamento da chapa para o interior da matriz, não permite que o ensaio tenha apenas deformações de estiramento. O fim do ensaio ocorre quando acontece a visualização da fratura, e o resultado é obtido medindo-se a máxima penetração do punção sem que tenha ocorrido a falha (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000). A Figura 5 representa as dimensões dos componentes utilizados no ensaio.

Figura 5 – Dimensões, em mm, dos componentes para o Ensaio Erichsen



Fonte: Adaptado de ASTM E643-84 (1992) apud Garcia; Spim; Santos (2000)

Tigrinho (2005) apresenta que, além do fato de sua grande utilização, os ensaios de estiramento possuem como principais vantagens a rapidez e a simplicidade operacional.

Segundo Souza (1982), a altura do copo após o ensaio é o Índice Erichsen de Embutimento (IE). De acordo com Oliveira (2010), materiais de boa estampabilidade no estiramento apresentam um valor elevado do IE. O mesmo autor explica que o IE possui uma relação positiva com o índice de encruamento (n) do material, ou seja, um aumento do Índice Erichsen de Embutimento (IE) resulta no aumento do índice de encruamento (n) e vice-versa.

Garcia, Spim e Santos (2000) apresentam que os corpos-de-prova utilizados podem ser circulares ou retangulares, onde o comprimento ou o diâmetro mínimo devem ser de 90,00 mm, e a espessura nominal deve estar entre 0,2 e 2,0 mm. Segundo a ABNT NBR 5902 (1980), o corpo-de-prova deve ser lubrificado com

graxa grafitada, e a força exercida pelo prensa-chapas deve ser de aproximadamente uma tonelada.

A velocidade de avanço do punção deve estar entre 0,08 e 0,40 mm/s, onde para obter-se maior precisão do ensaio, a velocidade pode ser reduzida quando aproximar-se da ruptura. Devido à dispersão dos resultados, em geral, pelo menos seis chapas devem ser ensaiadas indicando a média dos valores de avanço do punção (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

Um estudo apresentado por Akrou et al. (2008) determinou a força exercida exatamente no início da aparição da ruptura e o IE para diversos materiais de diferentes espessuras. O estudo também avaliou a influência da lubrificação sobre os parâmetros do ensaio. A Tabela 2 apresenta os valores encontrados no ensaio para as chapas de alumínio, assim como o valor teórico de referência para o IE. A lubrificação utilizada foi óleo mineral aplicada no *blank*.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios experimentais e valor teórico de referência

Material	Espessura (mm)	Sem lubrificação		Com lubrificação		Valor teórico
		IE (mm)	Força (N)	IE (mm)	Força (N)	IE (mm)
Alumínio	1,00	6,00	2.900	6,4	3.200	6,85

Fonte: Adaptado de Akrou et al. (2008)

Concluiu-se que a lubrificação pouco influencia no IE e na força exercida no momento da ruptura. O uso da lubrificação, segundo os autores citados, intervém no modo de deformação do componente estampado, diminuindo o atrito nas partes ativas da ferramenta o que contribui para um aumento na durabilidade da mesma. A diferença entre os valores teóricos e experimentais pode ser explicada por erros experimentais e na manipulação inadequada da máquina (AKROUT et al., 2008).

Segundo Siegert e Wagner (2010), o Índice Erichsen de Embutimento (IE) para ligas de alumínio pode variar de 9,4 a 10,5 mm. Em seus estudos, Siegert e Wagner (2010) utilizaram três diferentes ligas de alumínio de mesmas espessuras, sem lubrificação, obtendo valores do IE que variaram de 9,1 a 9,8 mm. Os autores também apresentam que os valores do Índice Erichsen de Embutimento (IE) são dependentes da espessura da chapa. Otomar (2010) realizou ensaios com diferentes ligas de alumínio AA1050, e obteve resultados que variaram de 11,9 a 12,6 mm para o IE. Conserva et al. (2012 apud OTOMAR, 2010) indica que os

dados de literatura para a liga AA1050 com espessura de 1,00 mm apresenta um IE de 11,2 a 11,6 mm.

2.5 ESTAMPAGEM PROFUNDA

Baseando-se na deformação plástica de uma chapa metálica, o processo de estampagem profunda, segundo Simões (2012), permite a obtenção de formas complexas através de um simples processo. O mesmo autor apresenta que o processo de estampagem profunda envolve três componentes: a matriz, que define a forma do produto a ser elaborado, o punção, que força o *blank* para o interior da matriz e deforma a chapa para a forma final, e o prensa-chapas, utilizado para pressionar a chapa metálica contra a matriz, prevenindo o enrugamento e controlando o deslizamento da chapa durante o processo.

2.5.1 Mecânica da Deformação na Estampagem

Segundo Rodrigues e Martins (2010), é habitual admitir-se que, para efetuar simplificações de cálculo e, considerando a conservação de volume, a variação de espessura da chapa durante o processo é pouco significativa, sendo possível a obtenção das dimensões da geratriz a partir da igualdade de áreas entre a chapa inicial e a chapa final.

A estampagem tem início quando o punção entra em contato com a chapa que está sobre a matriz e sujeitada pelo prensa-chapas, nesta fase o regime elástico ainda está presente (RODRIGUES; MARTINS, 2010). Conforme pode ser visualizado na Figura 6 (E), o metal situado logo abaixo do punção, segundo Garcia, Spim e Santos (2000), estará ao longo de todo o processo submetido a um estado biaxial (radial) de tração e será o fundo do copo após o final da conformação.

Com a redução do diâmetro original do *blank* até o diâmetro do punção, o metal sofre esforços de compressão na direção circunferencial e esforços de tração na direção radial (Figura 6(A)). É nesta região que o prensa-chapas atua, pressionando a chapa contra a matriz e garantindo o não enrugamento da borda (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

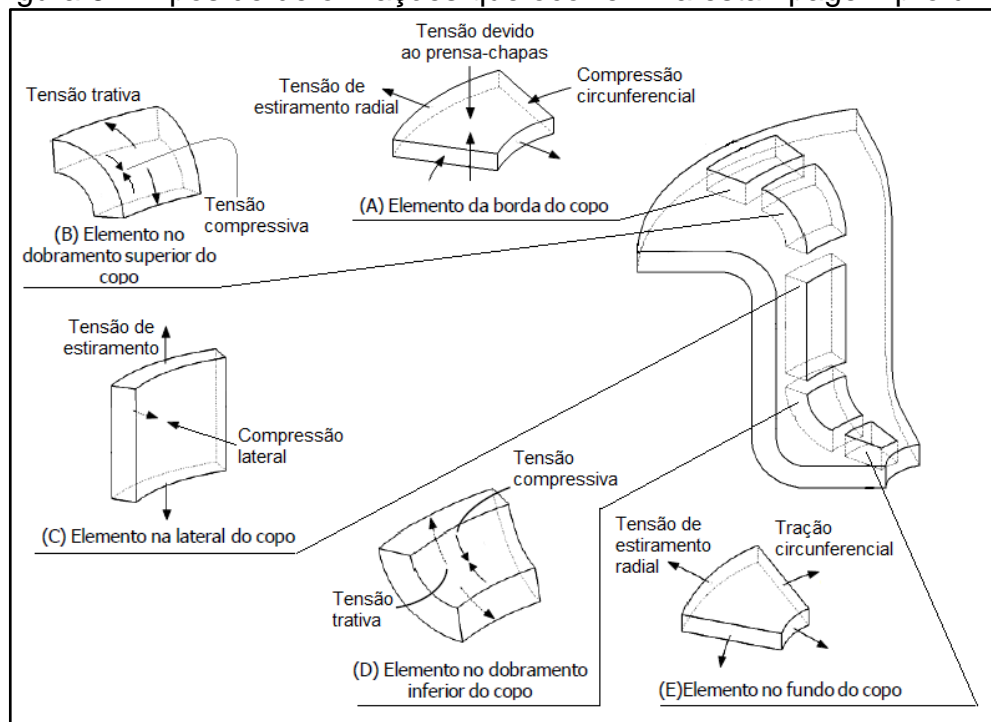
O avanço progressivo do punção ocasiona uma solicitação cada vez maior na região da aba, até que o regime plástico nesta região seja alcançado (RODRIGUES;

MARTINS, 2010). De acordo com Garcia, Spim e Santos (2000), à medida que o material é forçado para o interior da matriz, devido ao esforço trativo que ocorre na lateral do copo, ele é dobrado e em seguida endireitado, conforme pode ser visto na Figura 6(B). Os mesmos autores apresentam que na região demonstrada na Figura 6(C) ocorre a homogeneização da espessura da parede, em função do estiramento uniforme.

Devido ao encruamento e ao conseqüente aumento da tensão plástica, a força de conformação aumenta continuamente com o curso. A pressão de fixação da chapa é a principal responsável pela força de atrito, atingindo rapidamente um valor máximo e diminui com o aumento do curso, pelo fato de que a área do *blank* sob o prensa-chapas diminui continuamente (DIETER, 1981). Segundo Folle (2012), são nas regiões de contato *blank*/matriz/prensa-chapas e no raio do canto da matriz que o atrito tem maior efeito, pois são nestas regiões que há o movimento relativo entre material e ferramenta.

Estudos apontam que, no trabalho necessário para a estampagem profunda de um copo cilíndrico, 70 % são utilizados na conformação radial do metal, 13 % para superar o atrito e 17 % no dobramento e endireitamento em torno do raio da matriz (SWIFT, 1952 apud DIETER, 1981).

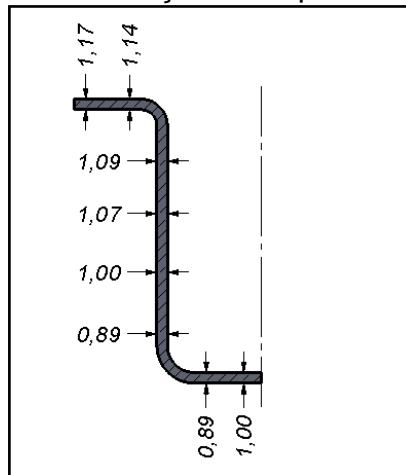
Figura 6 – Tipos de deformações que ocorrem na estampagem profunda



Fonte: Adaptado de Garcia, Spim e Santos (2000)

Segundo Bastos (2009), no embutimento de um copo, podem ocorrer variações de espessura relacionadas aos diferentes modos de deformação. A Figura 7 representa esquematicamente a variação de espessura de um copo com espessura inicial de 1,0mm.

Figura 7 – Representação da variação de espessura de um copo estampado



Fonte: Adaptado de Hosford e Caddell (2007) apud Bastos (2009)

2.5.2 Principais Parâmetros Envolvidos na Estampagem

O sucesso do processo de estampagem profunda de uma determinada peça está diretamente associado a alguns parâmetros como: velocidade de estampagem, força do prensa-chapas, coeficiente de atrito, temperatura e geometria da ferramenta. Atualmente, a influência de cada um destes parâmetros é bem conhecida e, por estarem conectados entre si, às vezes a variação de um implica na alteração de outro (SIMÕES, 2012). A seguir serão explanados alguns dos parâmetros mais importantes utilizados no processo de estampagem.

2.5.2.1 Pressão Nominal Exercida pelo Prensa-Chapas

O prensa-chapas controla o fluxo do *blank* para o interior da matriz e evita o enrugamento da região da aba, desta forma a pressão que o prensa-chapas irá exercer é de vital importância para a estampagem. Pressões muito elevadas podem contribuir para um aumento na força do punção, o que promoverá a redução de espessura na lateral do copo, ocasionando a ruptura do material (REDDY, V.R.; REDDY, T.A.J.; REDDY, G.C.M., 2012).

A pressão do prensa-chapas deveria ser variável ao longo da estampagem, isto porque a pressão exercida pelo prensa-chapas para iniciar a deformação plástica da região do canto da matriz e da aba deverá ser baixa. Conforme se inicia a deformação plástica desta região, a pressão exercida pelo prensa-chapas tende a aumentar. Com o escoamento da aba para dentro da matriz, seu perímetro externo também tende a diminuir, gerando uma redução progressiva na pressão exercida pelo prensa-chapas (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Rodrigues e Martins (2010) ressaltam que, como as prensas não dispõem deste tipo de regulação de pressão para o prensa-chapas, adota-se uma pressão constante ao longo do processo. Assim, o valor ótimo de força a ser aplicado pelo prensa-chapas, de acordo com os autores citados, depende da relação de estampagem, da espessura da chapa, do atrito e das características mecânicas do material.

Siebel (1956 apud SCHAEFFER, 2004) define que a pressão exercida pelo prensa-chapas pode ser obtida através da Equação 9.

$$P_{pc} = 0,0025 \left[(\beta - 1)^2 + 0,5 \cdot \frac{d_p}{100 \cdot s_0} \right] \cdot R_m \quad (9)$$

Rodrigues e Martins (2010) destacam que a pressão nominal do prensa-chapas a ser usada para o alumínio poderá variar de 0,80 a 1,4 N/mm².

2.5.2.2 Velocidade de Estampagem

Segundo Simões (2012), para materiais sensíveis a altas taxas de deformações, altas velocidades de estampagem podem levar o componente a ruptura. De acordo com Folle (2008), para estes materiais, maior será a capacidade do material ser deformado quanto menor for a velocidade do punção.

O aumento da velocidade de deformação influencia em um aumento dos parâmetros de resistência e uma diminuição dos parâmetros de ductilidade apenas em materiais menos dúcteis ou na estampagem de aços inoxidáveis. Porém, nas ligas de cobre e de alumínio, este efeito não é tão relevante, sendo possível a utilização de velocidades de estampagem maiores nestes materiais (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Rodrigues e Martins (2010) apresentam que o aumento da velocidade de estampagem beneficia a formação de um filme lubrificante entre a chapa e a ferramenta. Os autores indicam que a velocidade de estampagem para o alumínio, em condições ótimas de operação, pode variar de 53 m/min para prensas de simples efeito e 30 m/min para prensas de duplo efeito.

2.5.2.3 Força de Estampagem

Durante a primeira fase da estampagem, região onde acontece a configuração cônica, verifica-se que a força necessária é sempre crescente. A força máxima acontece no instante em que a zona do canto da matriz e da aba entram em deformação plástica, sendo neste ponto onde o deslocamento crítico do punção acontece, ou seja, haverá fratura na região do canto do punção quando a estampagem não for possível de ser realizada (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Segundo Pinheiro, Rodrigues e Abrão (2010), o fato da força de estampagem ser mais elevada no início da estampagem se deve à razão de haver uma maior superfície de contato entre o prensa-chapas e a matriz, o que dificulta o início da deformação plástica na região da aba.

De acordo com Rodrigues e Martins (2010), após ser atingida a força máxima de estampagem, a deformação plástica da zona do canto da matriz tem início, o que caracteriza o escoamento do material para o interior da matriz. Uma vez iniciada a segunda fase de estampagem, formação da zona cilíndrica, a força necessária para a continuação da operação de estampagem começa a reduzir até se anular.

O cálculo da força de estampagem no primeiro estágio é apresentado na Equação 10, onde k_{fm_1} é a tensão de escoamento média no primeiro estágio (SCHAEFFER, 2004).

$$F_1 = 5 \cdot d_p \cdot s_0 \cdot k_{fm_1} \cdot \ln \beta \quad (10)$$

2.5.2.4 Atrito e Lubrificação

Segundo Folle (2012), nos processos de estampagem, o sucesso para a obtenção de uma chapa conformada depende de três fatores: da geometria das ferramentas, das propriedades do material e da interação de contato entre as

superfícies desses dois materiais. O autor citado ressalta que o terceiro representa 5% do valor final da chapa, ou seja, o retorno é imediato aos fabricantes se qualquer melhora relacionada ao atrito for realizada na operação de estampagem.

A região que envolve o raio do canto da matriz e as regiões de contato prensa-chapas/*blank*/matriz da aba não devem apresentar atritos elevados. Nestas regiões a lubrificação inadequada pode gerar desgaste da ferramenta, além da ruptura do componente, ou seja, a lubrificação correta nestas regiões é benéfica para a estampagem. O mesmo não pode ser concluído para a região do canto do punção, pois a lubrificação (redução do atrito) desta zona geralmente torna-se prejudicial à operação, ou seja, o atrito desta região deverá ser suficientemente elevado a fim de assegurar que a chapa acompanhe o movimento do punção. Nas regiões do fundo do punção e da lateral do copo, a importância do atrito nada influencia na operação de estampagem (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Segundo Tigrinho et al. (2008), durante o processo de conformação, a lubrificação é normalmente aplicada ao longo da interface ferramenta-peça, o que melhora a estampabilidade da chapa. Schaeffer (2004) cita algumas funções do lubrificante nas operações de estampagem:

- Aumentar ou reduzir o atrito e o esforço no prensa-chapas.
- Evitar um contato direto entre a chapa e a ferramenta.

A aplicação dos lubrificantes deve ser feita com rolos simples, rolos duplos, pistola, imersão ou esponjas. A aplicação que permitir um controle sobre a espessura do filme lubrificante é a que deve ser utilizada no processo de estampagem. Para a lubrificação nas operações de estampagem utilizando o alumínio como material da chapa, são indicados lubrificantes minerais, vegetais, sintéticos, animais ou filmes plásticos (SCHAEFFER, 2004).

2.5.2.5 Raio do Canto do Punção e da Matriz

Segundo Özek e Bal (2009), com o aumento dos raios do punção e da cavidade, há um aumento da força exercida pelo punção na operação de estampagem, devido ao fato de que para aumentar os raios, o diâmetro do *blank* deve ser aumentado proporcionalmente, e a força transmitida pela parede do copo sofrerá um aumento, podendo ocasionar a falha da chapa.

No embutimento, a zona do canto do punção é a região que possui a maior concentração de tensões trativas, apresentando uma tendência natural ao rompimento na altura do raio do punção. Quanto menor o raio do punção, menor será a área de contato entre o punção e o *blank*, o que dificulta uma distribuição das forças aplicadas sobre o material, resultando em uma elevada deformação nesta região, sem distribuí-la para as regiões vizinhas do embutimento (CHEMIN FILHO, 2004).

Rodrigues e Martins (2010) apresentam que os valores do raio mínimo e máximo do canto do punção, para uma chapa de 1,00 mm de espessura, são respectivamente 4,7 mm e 7,9 mm.

Pode-se definir que, a redução do raio do canto da matriz na estampagem tem como principais consequências: o aumento da relação de estampagem; maior redução de espessura do copo, devido ao elevado coeficiente de atrito presente nesta região, ocorre um aumento do desgaste das ferramentas na região do canto da matriz; aumento da força de estampagem (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Schaeffer (2004) apresenta que, para uma primeira operação de estampagem, o raio do canto da matriz pode ser dimensionado utilizando a Equação 11.

$$r_{cm} = 0,6\sqrt{(D_0 - d_p) \cdot s_0} \quad (11)$$

2.5.2.6 Folga Entre Punção e Matriz

Segundo Rodrigues e Martins (2010), uma folga pequena entre o punção e a matriz pode resultar na trefilação da chapa, podendo causar a ruptura da chapa devido às elevadas solicitações que podem ocorrer na parede do copo ao final da operação. Os autores também apresentam que desgastes nos elementos ativos da ferramenta também podem acontecer.

Por outro lado, uma folga excessiva pode gerar uma dificuldade maior para atingir a deformação plástica da zona entre o canto da matriz e da aba. Com o aumento da folga, uma porção maior da geratriz deixa de ser atuada pelo prensa-chapas, permitindo que as zonas periféricas enruguem ao final da operação. Nestes casos, pode acontecer uma espécie de conicidade no copo estampado, ou seja,

pode-se gerar um diâmetro maior na zona superior ao final da estampagem (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Fadanelli (2001 apud SCHAEFFER, 2004) indica que a folga para aços e alumínio deve ser de pelo menos 10% da espessura (s) da chapa. O dimensionamento da folga (w) entre o punção e a matriz, segundo Tschätsch (1977 apud SCHAEFFER, 2004), pode ser baseado na Equação 12.

$$w = s \sqrt{\frac{D_0}{d_p}} \quad (12)$$

2.5.2.7 Determinação da Geratriz

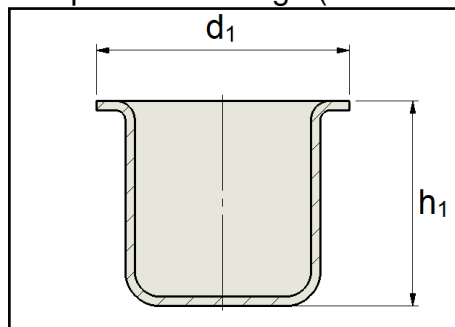
Segundo Rodrigues e Martins (2010), a espessura da chapa, em termos médios, se mantém constante durante a estampagem, permitindo efetuar o cálculo do diâmetro da geratriz através da igualdade entre a área da chapa inicial e final.

A fim de se evitar perdas excessivas e defeitos na chapa estampada, o perfeito dimensionamento e forma da geratriz são parâmetros importantes a serem calculados. Desta forma, o cálculo da geratriz para um copo cilíndrico com flange (Figura 8), é realizado utilizando a Equação 13 (SCHAEFFER, 2004).

$$D_0 = \sqrt{d_p^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h_1} \quad (13)$$

Onde, d_1 e h_1 são, respectivamente, o diâmetro maior do copo estampado e a altura total do copo estampado.

Figura 8 – Copo estampado com flange (com raios de pequeno valor)



Fonte: Adaptado de Schaeffer (2004)

2.5.2.8 Número de Operações Necessárias

Segundo Schaeffer (2004), para que não haja rompimento na conformação de uma geratriz de diâmetro inicial D_0 para um diâmetro final d_p , certos limites devem ser respeitados.

Para analisar se uma operação de estampagem é possível de ser efetuada, é usual comparar o valor da relação de estampagem (β), descrito na Equação 8, com a relação de estampagem admissível (β_{adm}), obtida através de ensaios descritos no capítulo 2.4.1. Assim, sempre que o valor da relação de estampagem (β) for superior à relação de estampagem admissível (β_{adm}), haverá rompimento da chapa no processo de estampagem, necessitando-se de mais de uma operação de estampagem (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Schaeffer (2006) apresenta que para uma primeira aproximação, a relação de estampagem admissível (β_{adm}) para materiais de menor estampabilidade, como o alumínio, pode ser calculada através da Equação 14.

$$\beta_{adm} = 2 - \frac{1,1 \cdot d_p}{1000 \cdot s_0} \quad (14)$$

2.6 PROPRIEDADES DO ALUMÍNIO

Materiais utilizados para os processos de repuxe e estampagem profunda, através do uso de chapas e discos, devem apresentar algumas propriedades mecânicas, tais como: elevada plasticidade, alta ductilidade e reduzida taxa de encruamento. Assim, as ligas de Alumínio das séries 1xxx e 3xxx são as mais utilizadas para estas aplicações, devido ao fato de que os melhores resultados são obtidos quando o metal apresenta um tamanho de grão reduzido e uniforme (ABAL, 2014).

Para identificar as ligas de alumínio, aquelas que possuem o identificador inicial com o número 1 (um), o primeiro dígito indica o grupo das ligas de alumínio não ligado, comercialmente puro, com no mínimo 99,00 % de pureza. O segundo dígito indica modificações da liga original ou dos limites de impurezas. Os dois últimos dígitos correspondem aos teores mínimos de alumínio na liga (OTOMAR, 2010).

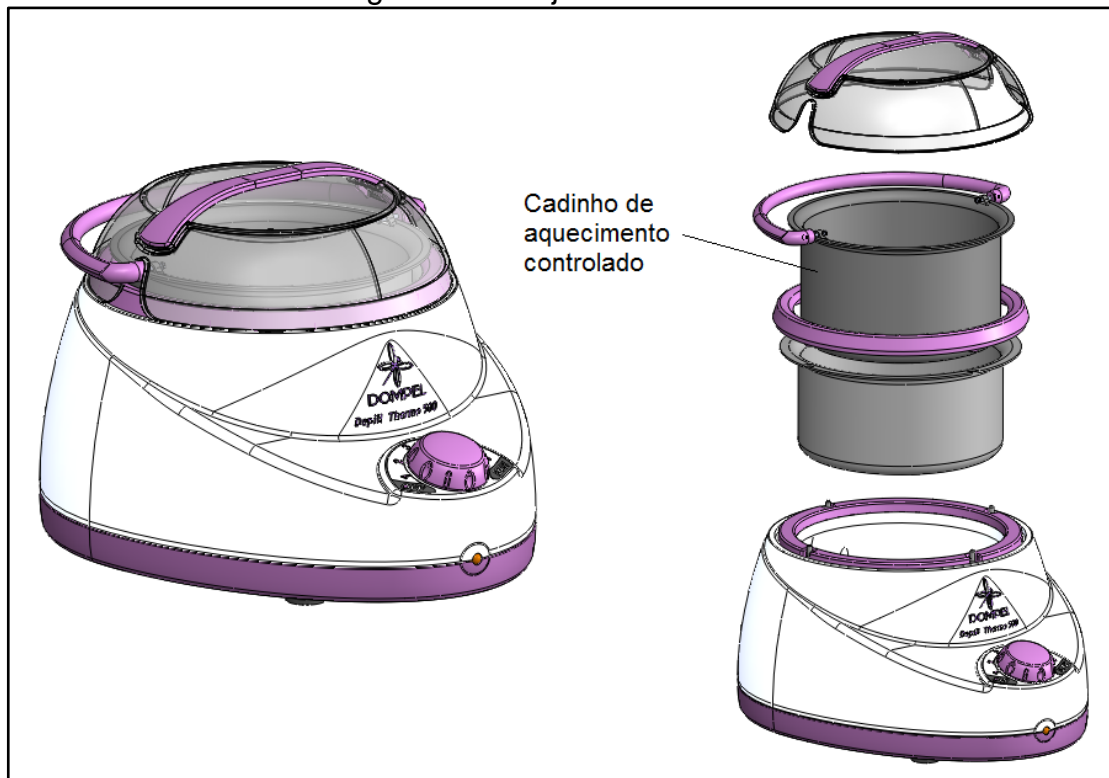
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para avaliar a estampabilidade do alumínio (1100), foram realizados ensaios de tração para determinar as propriedades mecânicas do material, como o índice de anisotropia e o índice de encruamento do material. Os Ensaio Swift e Erichsen auxiliam na avaliação da estampabilidade da matéria-prima.

3.1 PEÇA EM ESTUDO

O conjunto Termocera desenvolvido na Dompel está apresentado na Figura 9. A carcaça do conjunto foi produzida em polímero, e o componente em estudo (Cadinho de Aquecimento Controlado), produzido em alumínio da série 1100, tem espessura de 1,00 mm.

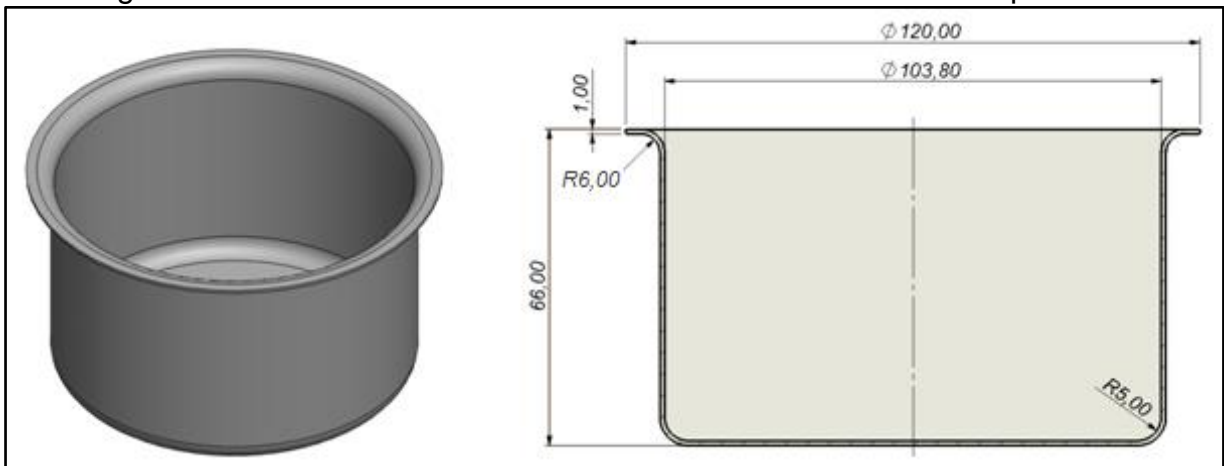
Figura 9 – Conjunto Termocera



Fonte: Scopel (2014)

As dimensões, em milímetros, do Cadinho de Aquecimento Controlado estão apresentadas da Figura 10.

Figura 10 – Vista isométrica e detalhamento dimensional do componente



Fonte: Scopel (2014)

3.2 MATERIAL UTILIZADO

Este trabalho utilizará como matéria-prima discos de alumínio da liga 1100, fornecidos pela empresa Laminação de Metais Paulista Ltda. Segundo o certificado de qualidade da matéria-prima apresentado pelo fornecedor, a composição química e as propriedades mecânicas do alumínio utilizado neste estudo estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Composição química da liga 1100

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Pb	Ti	Al
%	0,09	0,42	0,05	0,02	0,01	0,02	0,005	0,019	0,019	99,32

Fonte: Laminação de Metais Paulista Ltda (2014)

Tabela 4 – Propriedades mecânicas da liga 1100

Alongamento	Escoamento	Resistência	Dureza
38 %	38 MPa	85 MPa	25,9 HB

Fonte: Laminação de Metais Paulista Ltda (2014)

Como os valores do catálogo não determinam o comportamento do material sob condição de estampagem profunda, gerou-se a necessidade de realizar ensaios adicionais, a fim de verificar a estampabilidade do material. Desta forma, foi possível avaliar com maior precisão as reais condições de trabalho e conhecer de forma mais detalhada as características do material.

3.3 ANÁLISE METALOGRAFICA

A fim de verificar a direção de laminação da chapa, cortou-se um corpo-de-prova na direção perpendicular e outro na direção paralela ao padrão impresso na superfície da chapa (riscos), conforme Figura 14. As amostras foram embutidas com as faces rebatidas visíveis, de acordo com a Figura 14, utilizando técnicas convencionais para o polimento mecânico. Foi realizado ataque químico com ácido fluorídrico (0,5 %) e duração de aproximadamente 30 segundos. Com o auxílio de um microscópio, registraram-se algumas imagens das microestruturas.

Devido à dificuldade na identificação da direção de laminação da chapa, realizou-se uma segunda análise metalográfica. As amostras foram embutidas com a face superior da chapa visível. Utilizaram-se técnicas convencionais para o polimento mecânico e ataque eletrolítico com reativo de Nital (5,0 %), duração de 30 segundos.

3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

As dimensões e o formato dos corpos-de-prova foram referenciados segundo a norma ABNT NBR 7549 (2008), que descreve o ensaio de tração para alumínio. Convencionou-se a utilização dos corpos-de-prova com formato retangular, sem o rebaixo central (ANEXO A), atendendo as dimensões estabelecidas na norma indicada.

Foram extraídos quatro corpos-de-prova para cada direção de laminação (0° , 45° e 90°), dois cada direção para determinar o índice de encruamento (n), a tensão de escoamento (σ_e), a resistência máxima (R_m) e o alongamento máximo (Δl), e outros dois cada direção para determinar o índice de anisotropia (r), totalizando doze corpos-de-prova (Tabela 5).

Os corpos-de-prova para o ensaio de tração foram extraídos utilizando uma máquina eletroerosão a fio. Apesar deste processo de corte proporcionar um bom acabamento final, as faces laterais dos corpos-de-prova foram retificadas.

Os ensaios de tração foram realizados na máquina da marca EMIC, com capacidade de 20 t, localizada no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da UCS. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 6673: 1981 e a velocidade do ensaio foi de 10,0 mm / min.

Tabela 5 – Quantidade de corpos-de-prova utilizados no ensaio de tração

Direção de laminação	Quantidade de corpos-de-prova para determinar n , σ_e , R_m e $\Delta\ell$	Quantidade de corpos-de-prova para determinar r	Total de corpos-de-prova para cada direção de laminação
0°	2	2	4
45°	2	2	4
90°	2	2	4
Total de corpos-de-prova			12

Fonte: Scopel (2014)

3.4.1 Curva de Escoamento

Para obter as curvas de escoamento dos seis corpos-de-prova, os dados das forças e das deformações obtidos em cada instante para cada corpo-de-prova foram transferidos para o Excel. Os cálculos para gerar os gráficos tensão de escoamento (k_f) x deformação verdadeira (φ) foram efetuados considerando a deformação relativa (ε) de 1,0 % a 18 %. Foi adicionada uma linha de tendência do tipo potência na curva do gráfico, onde a equação obtida ficou equivalente à Equação 4, que descreve o comportamento do material em regime plástico. Através das curvas de escoamento geradas nos gráficos, foram obtidos o índice de encruamento (n) e a constante (C) do material. Este processo foi repetido para os dois corpos-de-prova de cada direção de laminação, totalizando seis ensaios.

3.4.2 Índice de Anisotropia

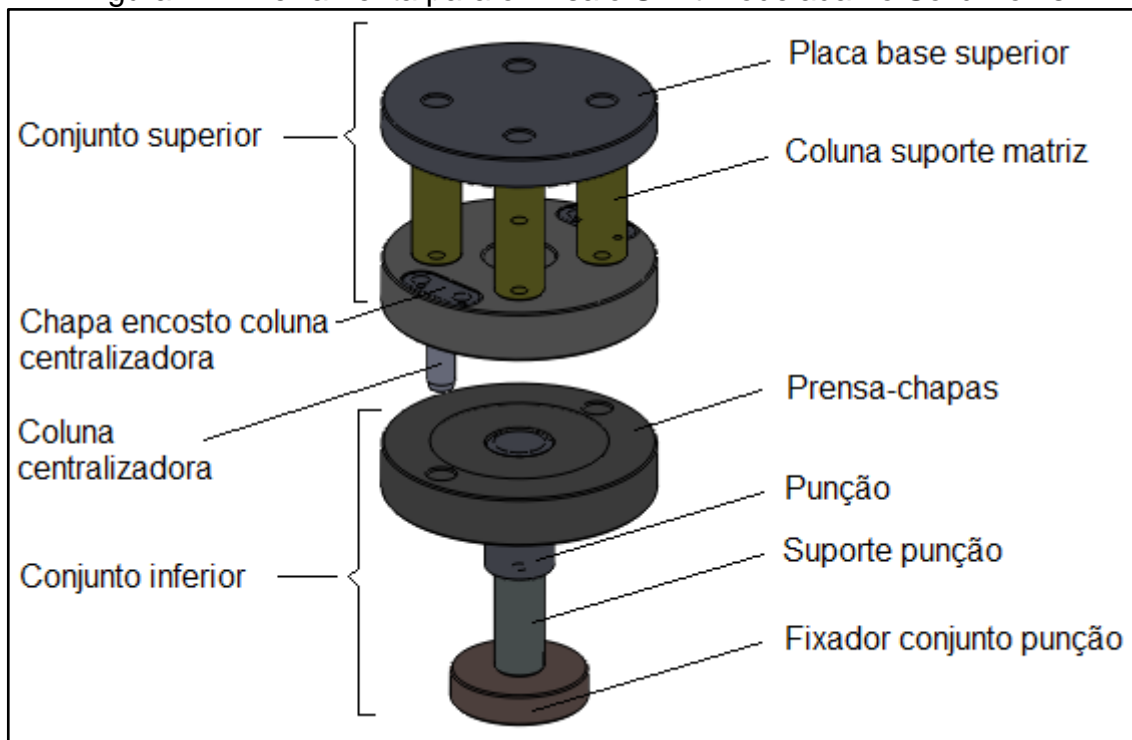
Para determinar o índice de anisotropia (r), conforme o Anexo B, foram marcadas e medidas três regiões (b_{01} , b_{02} e b_{03}) e o comprimento inicial (L_0) entre b_{01} e b_{03} em cada corpo-de-prova antes de iniciar o ensaio de tração. Ao final do ensaio, as mesmas dimensões foram medidas novamente, obtendo-se os novos valores b_{11} , b_{12} e b_{13} e L_1 . Este processo foi repetido para os dois corpos-de-prova de cada direção de laminação, totalizando seis ensaios. De posse dos valores, efetuou-se uma média para as larguras (iniciais e finais) e para os comprimentos (iniciais e finais) dos dois corpos-de-prova de cada direção de laminação. Foi utilizada a Equação 5 para determinar o índice de anisotropia (r) para cada direção de laminação, obtendo-se r_{0° , r_{45° e r_{90° .

Com os resultados de r_{0° , r_{45° e r_{90° , foram calculados os valores do coeficiente de anisotropia planar (Δr), através da Equação 6, e do coeficiente de anisotropia normal médio (r_m), através da Equação 7.

3.5 ENSAIO SWIFT

Os componentes para a ferramenta (Figura 11) do Ensaio Swift foram modelados com o auxílio do software CAD SolidWorks. Como não existe uma norma específica para o ensaio, as dimensões do diâmetro do punção (50,00 mm) e do diâmetro da matriz (52,50 mm) foram consideradas segundo o estudo de Folle (2012), o qual indica esta folga ideal para uma chapa de alumínio de 1,0 mm espessura. Os raios do punção e da matriz (6,35 mm) foram modelados de acordo com Pinheiro, Rodrigues e Abrão (2010).

Figura 11 – Ferramenta para o Ensaio Swift modelada no SolidWorks



Fonte: Scopel (2014)

O restante da ferramenta foi projetado de acordo com as restrições dimensionais da prensa, ou seja, respeitando alturas e diâmetros mínimos. O prensa-chapas necessitava de um diâmetro mínimo de 180,00 mm, devido aos pinos da prensa que estão localizados na parte inferior da máquina e responsáveis pelo

movimento do prensa-chapas. A altura mínima requisitada para o conjunto inferior (Figura 11) era de 190,00 mm e para o conjunto superior (Figura 11) era de 150,00 mm.

Todos os componentes da ferramenta foram fabricados em aço carbono SAE 1045. Devido ao contato constante do *blank* com o prensa-chapas, com a matriz e com o punção, estes três componentes precisaram ser temperados, a fim de obter-se uma dureza superficial maior (54 HRC) e evitar riscos superficiais no momento do ensaio.

Eliminaram-se as marcas de usinagem no rebaixo do prensa-chapas, onde o corpo-de-prova é posicionado. O diâmetro interno da matriz, o raio de canto da matriz e a face de contato da matriz com o *blank* foram polidos. A face lateral do punção foi retificada e, o topo e o raio de canto do punção também receberam polimento. A Figura 12 apresenta a ferramenta para o Ensaio Swift finalizada, mostrando o conjunto inferior da ferramenta no lado esquerdo da figura, e o conjunto superior no lado direito da figura.

Figura 12 – Ferramenta para o Ensaio Swift finalizada.



Fonte: Scopel (2014)

O ensaio foi realizado em uma prensa de duplo efeito do tipo H e os corpos-de-prova foram cortados em um dispositivo mecânico com regulagem de diâmetro. Ensaios preliminares foram realizados para determinar a pressão exercida pelo prensa-chapas, esta mantida constante durante todo o ensaio.

Para avaliar o efeito da lubrificação no processo, foi realizado um ensaio com lubrificação e outro sem lubrificação. A lubrificação utilizada foi um composto de lubrificante graxo com água, aplicado diretamente no corpo-de-prova.

O ensaio consistiu no embutimento completo dos corpos-de-prova sem que tenha ocorrido a ruptura ou falhas superficiais da peça. Para tanto, foram aumentados os diâmetros dos corpos-de-prova com incrementos de 1,0 mm, até um valor máximo de diâmetro do corpo-de-prova. Devido aos diâmetros diferentes dos corpos-de-prova aplicados no ensaio, utilizou-se um paquímetro analógico para a centralização dos discos.

3.6 ENSAIO ERICHSEN

O dispositivo utilizado para o ensaio foi o modelo 122 da marca Erichsen (Figura 13). O dispositivo possui uma escala que deve ser ajustada conforme espessura da chapa. A força exercida pelo prensa-chapas é de 10 kN e as hastes de penetração devem ser giradas no sentido horário. O dispositivo possui um contador com escala de 0,1 mm, que registra a altura de penetração, além de uma abertura na parte superior que permite a visualização do ensaio.

Figura 13 – Dispositivo utilizado para o Ensaio Erichsen.



Fonte: Scopel (2014)

Os corpos-de-prova foram cortados com diâmetro de 90,00 mm na eletro a fio, pois, segundo Garcia, Spim e Santos (2000), os corpos-de-prova utilizados podem ser circulares com diâmetro mínimo de 90,00 mm. Foram cortados no total seis corpos-de-prova

Ensaíram-se seis corpos-de-prova, três com lubrificação e três sem lubrificação. O lubrificante utilizado no ensaio foi parafina líquida, também conhecida como vaselina, conforme especificado na norma ABNT NBR 5902 (1980).

Após inserir o corpo-de-prova no dispositivo, as hastes superiores foram giradas no sentido horário para prender o corpo-de-prova, até o marcador de dígito quatro. Fixado o corpo-de-prova, deu-se início à penetração do punção na chapa, girando as hastes inferiores no sentido horário. Através da abertura superior do dispositivo e do contador, localizado na parte inferior, foi possível fazer o acompanhamento do modo de conformação e da altura registrada. O fim do ensaio ocorreu com a visualização do início da fratura, onde o resultado do ensaio foi a altura máxima atingida registrada no contador. O mesmo foi repetido para todos os corpos-de-prova.

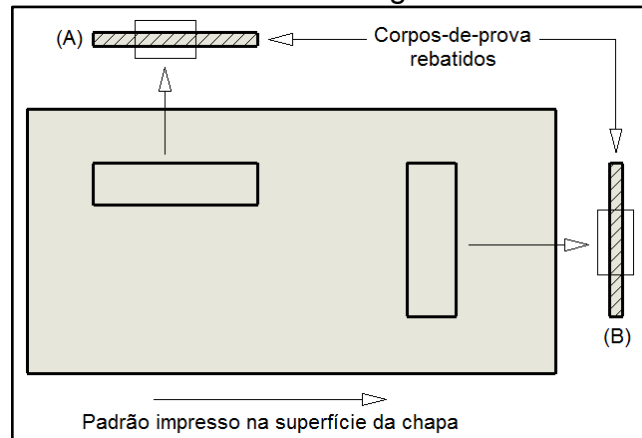
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão comparados os resultados obtidos para o índice de encruamento (n), índice de anisotropia (r), tensão de escoamento (σ_e), resistência máxima (R_m), alongamento máximo (Δl), relação de estampagem (β) e Índice Erichsen de Embutimento (IE) com os valores teóricos obtidos na literatura, a fim de validar a estampabilidade do alumínio 1100. Foram definidos também os parâmetros do processo e a geometria da ferramenta de estampagem profunda.

4.1 ANÁLISE METALGRÁFICA

Depois de extrair os corpos-de-prova em duas diferentes direções ao padrão impresso na superfície da chapa, realizou-se o embutimento dos corpos-de-prova de acordo com os rebatimentos ilustrados na Figura 14.

Figura 14 – Forma de extração e embutimento dos corpos-de-prova para a primeira análise metalográfica

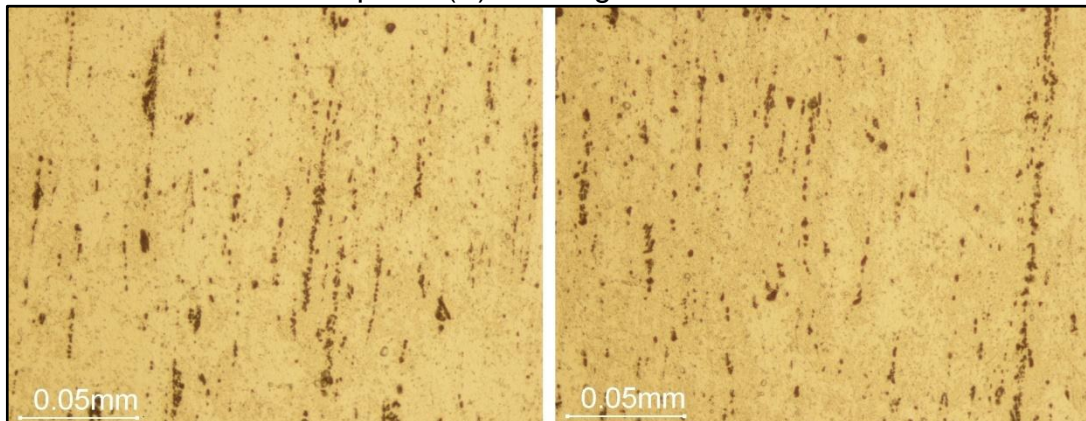


Fonte: Scopel (2014)

Através das imagens obtidas da amostra, com aproximação microscópica de 500X, verificou-se através da Figura 15 que não foi possível diferenciar a direção de laminação.

Na imagem esquerda da Figura 15, o corpo-de-prova (A) foi posicionado paralelo ao padrão impresso na superfície da chapa (riscos), enquanto que na imagem direita, o corpo-de-prova (B) foi posicionado perpendicular ao padrão impresso na superfície da chapa.

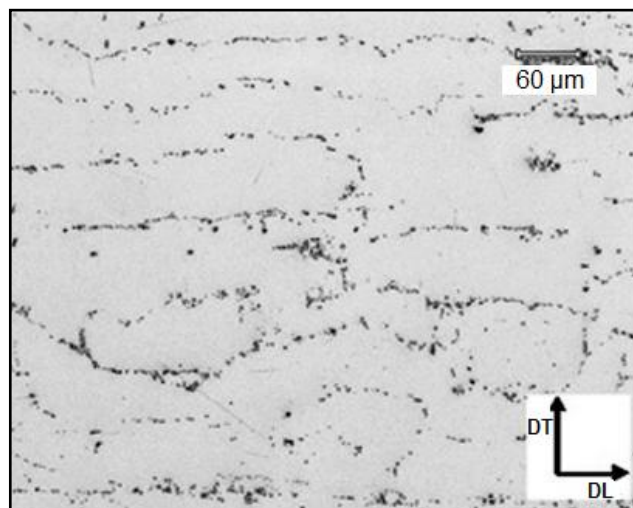
Figura 15 – Microestrutura do corpo-de-prova (A) na imagem à esquerda e, corpo-de-prova (B) na imagem à direita.



Fonte: Scopel (2014)

Analisando a Figura 15, verifica-se que ambas as amostras apresentaram microestruturas semelhantes, o que dificultou a identificação da direção de laminação da chapa. Em um estudo de Torres de Oliveira e Padilha (2009), a aglomeração de precipitados para uma chapa de alumínio 1100 com aproximação de 100X, conforme Figura 16, ocorreu na direção de laminação da chapa.

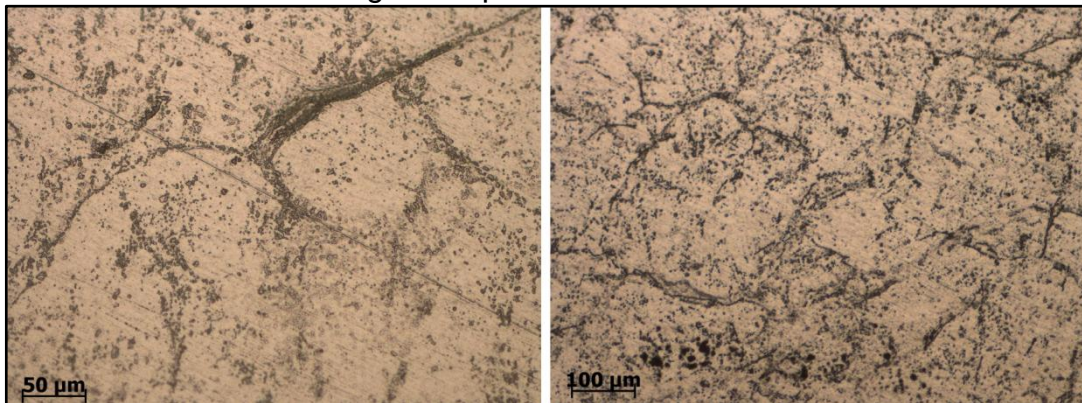
Figura 16 – Micrografia com a distribuição dos precipitados no alumínio 1100



Fonte: Adaptado de Torres de Oliveira e Padilha (2009)

A Figura 17 apresenta as imagens obtidas da segunda análise metalográfica, onde verificou-se novamente que não foi possível determinar a direção de laminação da chapa.

Figura 17 – Microestrutura da superfície plana da chapa com aproximação de 200X na imagem esquerda e 100X na direita



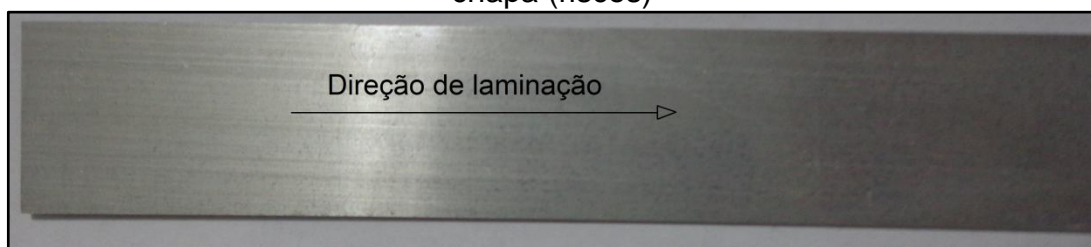
Fonte: Scopel (2014)

O processo de laminação contínua, utilizado para o alumínio e que elimina o processo de laminação a quente, consiste em solidificar o alumínio entre dois cilindros refrigerados internamente por água, gerando uma chapa com seção retangular. Assim, a dificuldade na identificação da direção de laminação da chapa pode ser explicada devido à alta eficiência do refinador de grão utilizado no vazamento, proporcionando uma estrutura bruta de fusão da chapa bastante refinada (ABAL, 2014).

Pode ser verificada, por meio da Figura 17, a aglomeração de precipitados devido à alta concentração de contaminantes como o ferro (Tabela 3). Observa-se que os contornos dos grãos possuem uma geometria próxima à equiaxial, o que gera um baixo índice de anisotropia planar e dificulta a identificação na direção de laminação da chapa.

Assim, para este estudo, utilizou-se a direção de laminação como sendo a direção paralela ao padrão impresso na superfície da chapa, conforme Figura 18, que corrobora com o 'orelhamento' macroscópico a 45° e 135° em relação à direção de laminação da chapa (Figura 22).

Figura 18 – Direção de laminação paralela ao padrão impresso na superfície da chapa (riscos)



Fonte: Scopel (2014)

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Através do Registro de Ensaio de Tração foram obtidos os valores correspondentes à tensão de escoamento (σ_e), resistência máxima (R_m) e alongamento máximo (Δl) do material. Efetuou-se uma média aritmética dos valores para os dois corpos-de-prova de cada direção de laminação (Tabela 6).

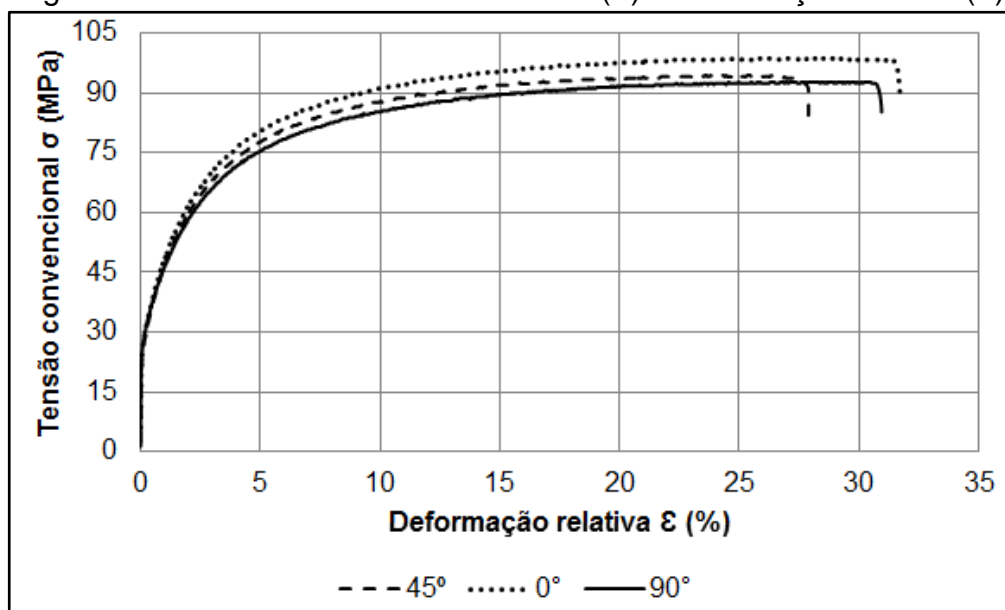
Tabela 6 – Médias dos dados obtidos no Registro de Ensaio de Tração

Direção de Laminação	σ_e (MPa)	Média σ_e (MPa)	R_m (MPa)	Média R_m (MPa)	Δl (%)	Média Δl (%)
0°	31,9	31,7	98,0	98,3	35,6	33,7
	31,4		98,6		31,8	
45°	30,2	30,7	94,4	94,5	27,8	31,5
	31,1		94,6		35,2	
90°	31,5	31,2	92,8	92,9	31,0	30,7
	30,8		93,0		30,4	

Fonte: Scopel (2014)

Para gerar os gráficos necessários, foram transferidos os dados de força e deformação para uma planilha do Excel, obtendo-se os valores referentes à deformação relativa (ϵ), tensão convencional (σ), deformação verdadeira (φ) e tensão de escoamento (k_f). A Figura 19 apresenta um gráfico da tensão convencional x deformação relativa, gerado para as três direções de laminação.

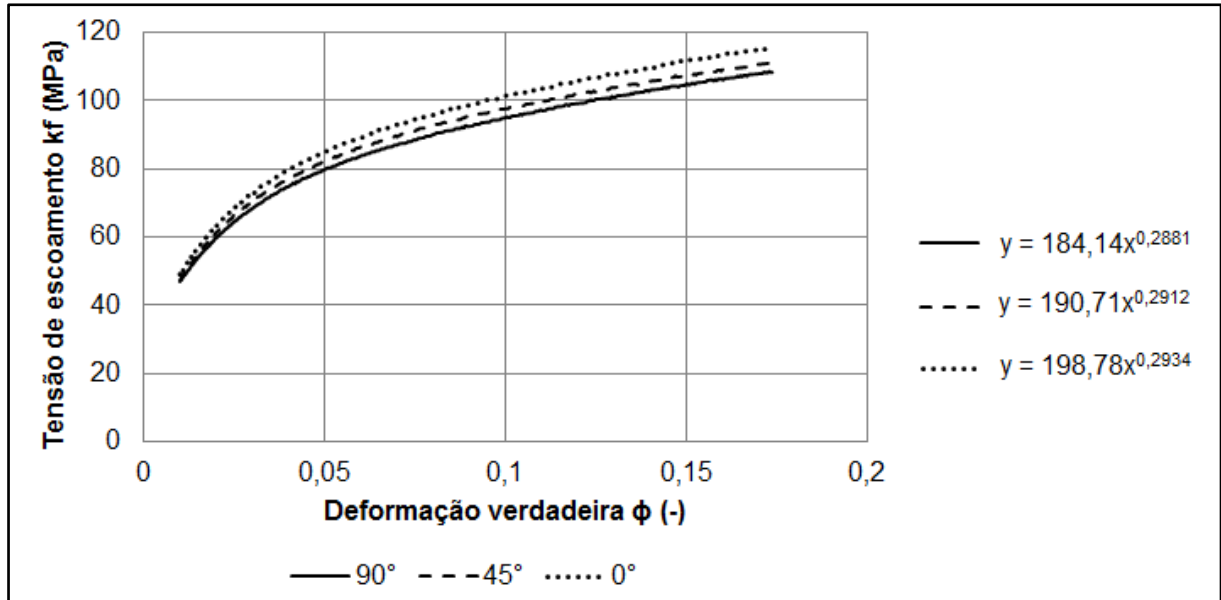
Figura 19 – Gráfico tensão convencional (σ) x deformação relativa (ϵ)



Fonte: Scopel (2014)

A Figura 20 mostra o comportamento do material na região plástica, determinada através da tensão de escoamento \times deformação verdadeira, para as três direções de laminação.

Figura 20 – Gráfico tensão de escoamento (kf) x deformação verdadeira (ϕ)



Fonte: Scopel (2014)

4.2.1 Curva de Escoamento

As curvas de escoamento foram obtidas a partir dos gráficos tensão de escoamento (kf) \times deformação verdadeira (ϕ), onde: $y = kf$; $C =$ coeficiente da equação; $x = \phi$ e $n =$ expoente da equação. Foi obtida uma curva de escoamento para cada um dos seis corpos-de-prova, sendo duas para cada direção de laminação (Apêndice D). Obtidos os índices de encruamento (n) e as constantes (C) do material e, de acordo com Tigrinho (2011), realizou-se uma média aritmética para os dois corpos-de-prova de cada direção de laminação, seguida de uma média ponderada para os três valores de cada direção de laminação (Apêndice E).

Assim, utilizando a Equação 7 e os valores obtidos da Tabela 11 no Apêndice E, foram determinados os valores finais $C = 191,24$ e $n = 0,2920$. Substituindo n e C na Equação 4, obteve-se a curva de escoamento da liga de alumínio 1100, ou seja, $kf = 191,24 \cdot \phi^{0,2920}$.

Pode-se observar que os valores obtidos no ensaio de tração para a tensão de escoamento (σ_e), para a resistência máxima (R_m) e para o alongamento máximo

(Δl), aproximaram-se dos valores apresentados no certificado de qualidade. Os valores teóricos apresentados na Tabela 4 para a tensão de escoamento, para a resistência máxima e para o alongamento máximo são, respectivamente, 38 MPa, 85 MPa e 38,00 %.

Verificou-se que o índice de encruamento (n) também se aproximou dos valores propostos por Siegert e Wagner (2010). Os autores citados indicam que o índice de encruamento (n) para ligas de alumínio podem variar de 0,22 a 0,31.

4.2.2 Índice de Anisotropia

Através dos cálculos efetuados (Apêndice C) utilizando as Equações 5 e 6, foram obtidos os valores $r_{0^\circ} = 0,61$; $r_{45^\circ} = 0,71$; $r_{90^\circ} = 0,45$ e $\Delta r = - 0,18$. A partir dos valores calculados, pode-se confirmar o que Rodrigues e Martins (2010) apresentam, que nem sempre o coeficiente de anisotropia planar é constante no plano da chapa. Os mesmos autores indicam que, materiais com $\Delta r < 0$ apresentam orelhas a 45° (Figura 1), pois estes materiais deformam-se menos nas regiões de coeficientes de anisotropia normal mais elevados e deformam-se mais nas regiões onde os coeficientes de anisotropia normal são reduzidos.

Utilizando a Equação 7, determinou-se o coeficiente de anisotropia normal médio, obtendo como resultado $r_m = 0,62$. Novotny e Hein (2001 apud SCHAEFFER, 2004) mostram que materiais com $r < 1$ não apresentam boa estampabilidade, pois segundo Rodrigues e Martins (2010), valores reduzidos do índice de anisotropia (r) facilitam a redução de espessura da chapa. O valor determinado de r_m através do ensaio de tração aproximou-se dos valores estipulados por Siegert e Wagner (2010) e por Rodrigues e Martins (2010). Os primeiros autores indicam valores de 0,56 a 0,85 para ligas de alumínio, já os segundos autores informam que os valores de r_m para estampagem do alumínio pode variar de 0,5 a 1,0.

4.3 ENSAIO SWIFT

Para determinar a faixa em que se encontravam os possíveis diâmetros de falha, partiu-se com o corpo-de-prova de diâmetro igual a 105,00 mm ($\beta = 2,1$), pois segundo a literatura, os valores extremos para o β do alumínio podem variar de 1,67 a 2,1. Este diâmetro de corpo-de-prova rompeu facilmente (Figura 21), tanto com

lubrificação quanto sem lubrificação. Desta forma, foi utilizado o extremo oposto ($\beta = 1,67$), o que resulta em um diâmetro de corpo-de-prova de 83,50 mm. Assim, iniciou-se o ensaio com diâmetro de disco de 85,00 mm e com lubrificação (Figura 21).

Figura 21 – Corpos-de-prova gerados em ensaios preliminares.



Fonte: Scopel (2014)

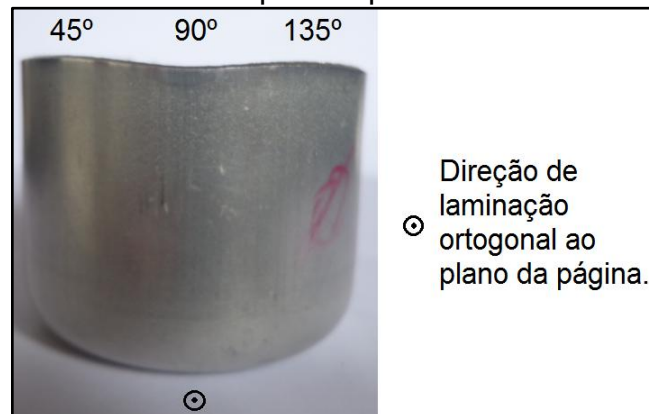
Para o ensaio sem lubrificação, iniciou-se com diâmetro de corpo-de-prova inferior a 85,00 mm (\varnothing 76,00 mm), aumentando sistematicamente até a ocorrência da falha. Os resultados obtidos para as duas situações ensaiadas estão apresentados na Tabela 7 do Apêndice A. Em todos os testes em que houve falha, o rompimento do corpo de prova ocorreu no raio de canto do punção.

O efeito do lubrificante neste ensaio apresentou uma pequena diferença nos diâmetros finais de discos estampados. Com lubrificação, o maior diâmetro de disco estampado com sucesso foi de 100,50 mm ($\beta = 2,01$) e sem lubrificação o diâmetro máximo de disco estampado sem falha foi de 95,00 mm ($\beta = 1,90$).

Os valores obtidos para a relação de estampagem (β) do alumínio encontraram-se dentro da faixa indicada por Rodrigues e Martins (2010) e por Siegert e Wagner (2010). Os primeiros autores apresentam uma faixa de variação para β de 1,67 a 1,89 e, os segundos autores indicam valores de 2,08 a 2,1.

Através do Ensaio Swift foi possível verificar um fenômeno que, segundo Rodrigues e Martins (2010), normalmente ocorre em materiais que apresentam índice de anisotropia planar menor que um ($\Delta r < 1,0$), a formação de 'orelhas' a 45° e 135° em relação ao sentido de laminação da chapa, conforme Figura 22.

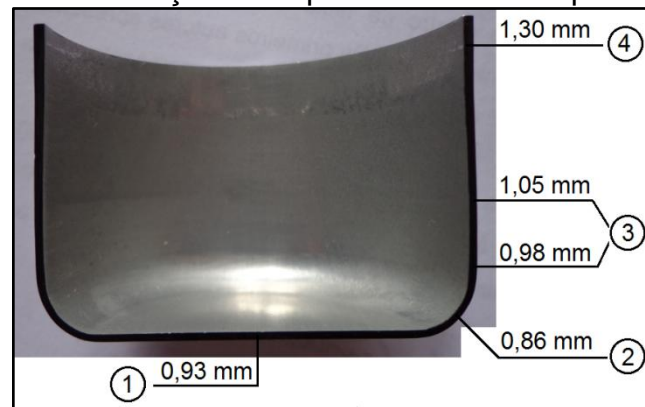
Figura 22 – ‘Orelhas’ a 45° e 135° em relação à direção de laminação de um dos corpos-de-prova.



Fonte: Scopel (2014)

A fim de verificar possíveis variações nas espessuras dos corpos-de-prova ensaiados, cortou-se um deles ao longo do eixo da seção cilíndrica, avaliando-se a espessura da parede. O corte foi realizado em uma máquina eletroerosão a fio, a fim de evitar rebarbas, erros de centralização de corte e deformações no componente (Figura 23). Para melhor visualização da diferença de espessuras, o perfil foi pintado de preto, e as medições foram realizadas utilizando um paquímetro digital.

Figura 23 – Variação de espessura de um corpo-de-prova



Fonte: Scopel (2014)

Uma análise da Figura 23 mostra que a redução de espessura da região 1 se deve ao fato do material oferecer maior resistência à conformação nesta região, provocando um aumento das tensões radiais e tangenciais. O aumento de espessura na região 4 ocorre em função do material oferecer menores resistências à deformação plástica nesta região (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Ainda na Figura 23, pode-se verificar que a região 2 apresentou a menor espessura (0,86 mm), pois segundo Chemin Filho (2004), esta região possui a maior

concentração de tensões trativas. Observa-se que na região 3 a espessura da parede apresenta-se mais homogênea, pois segundo Rodrigues e Martins (2010), isto ocorre devido ao estiramento uniforme que há nesta região.

4.4 ENSAIO ERICHSEN

Os valores obtidos no ensaio para o Índice Erichsen de Embutimento (IE), determinados através da altura máxima atingida pelo punção no momento da visualização da fratura, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores obtidos para o IE no Ensaio Erichsen

	IE (mm)	Média com desvio padrão (mm)
Sem Lubrificação	9,6	9,5 ± 0,12
	9,4	
	9,4	
Com Lubrificação	10,2	10,2 ± 0,06
	10,3	
	10,2	

Fonte: Scopel (2014)

A Figura 24 apresenta um corpo-de-prova ensaiado, com a calota esférica provocada pelo punção.

Figura 24 – Fratura em um corpo-de-prova do ensaio Erichsen.



Fonte: Scopel (2014)

Através do Ensaio Erichsen foi possível confirmar que a lubrificação possui pouca influência no IE. Pode-se notar que, a lubrificação influencia na variação dos valores obtidos, ou seja, utilizando lubrificante o desvio padrão é menor. Assim,

pode-se considerar que, segundo Akrou et al. (2008), a lubrificação modifica a distribuição das deformações da chapa estampada e diminui o atrito nas partes ativas da ferramenta.

Os valores encontrados para o IE neste ensaio aproximaram-se dos valores encontrados por Siegert e Wagner (2010). Os autores citados apresentaram valores experimentais para três diferentes ligas de alumínio de mesmas espessuras e sem lubrificação, que variaram de 9,1 a 9,8 mm.

Por se tratar de um ensaio totalmente manual, a diferença apresentada entre os valores experimentais e os valores teóricos pode ser explicada por erros experimentais e na manipulação inadequada da máquina (AKROUT et al., 2008).

4.5 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO E A GEOMETRIA DA FERRAMENTA

Neste capítulo serão apresentados os valores calculados, conforme Apêndice B, dos parâmetros necessários ao processo e à geometria da ferramenta de estampagem profunda.

4.5.1 Número de Operações Necessárias

Foi calculada através da Equação 14 a relação de estampagem admissível (β_{adm}) para materiais de menor estampabilidade, como o alumínio, obtendo-se o valor de $\beta_{adm} = 1,88$.

A relação de estampagem do Cadinho de Aquecimento Controlado (β_{CAC}) foi determinada utilizando a Equação 8, resultando no valor de $\beta_{CAC} = 1,93$.

Como $\beta_{CAC} > \beta_{adm}$, mais de uma operação seria necessária para que não houvesse rompimento da chapa no processo de estampagem.

Com o propósito de validar o número de operações necessárias sob condições reais de conformação, foi realizado o Ensaio Swift para determinar a relação de estampagem admissível real do material.

4.5.2 Determinação da Geratriz

Para a determinação do diâmetro da geratriz, primeiramente calculou-se através da Equação 13, utilizada na estampagem de um copo cilíndrico com flange e raios de pequenos valores, obtendo-se um valor de $D'_0 = 206,00$ mm.

A fim de se determinar um diâmetro de geratriz mais preciso, considerando as áreas relacionadas aos raios do Cadinho de Aquecimento Controlado, efetuou-se a igualdade entre a área da chapa inicial e final. Desta forma, foi determinada a área final total do componente através da linha média e do software CAD SolidWorks, obtendo-se o valor de $31,6$ mm². Através da igualdade de áreas, o diâmetro da geratriz resultou em $D''_0 = 200,00$ mm, valor utilizado para as demais equações deste trabalho.

4.5.3 Raio do Canto do Punção e da Matriz

Como o projeto do componente já está definido, para o raio do canto do punção a literatura indica valores de referência mínimos de 4,7 mm e máximos de 7,9 mm para uma chapa de alumínio de 1,00 mm de espessura. Como o componente em estudo já possui raio de 5,00 mm, não houve necessidade de alterações.

O raio do canto da matriz, para uma primeira operação de estampagem, foi dimensionado utilizando a Equação 11, resultando em $r_{cm} = 6,00$ mm. Como o Cadinho de Aquecimento Controlado possuía um raio com menor valor (4,00 mm), o mesmo foi redimensionado para 6,00 mm.

4.5.4 Diâmetro da Matriz

Como o diâmetro do punção já está definido, o diâmetro da matriz foi obtido através da folga dada entre os dois componentes. Assim, a folga entre o punção e a matriz foi determinada utilizando a Equação 12, obtendo-se o valor de $w = 1,40$ mm. Obtida a folga necessária entre os dois componentes, o diâmetro da matriz resultou no valor de $d_m = 106,6$ mm.

4.5.5 Força de Estampagem e Pressão Exercida pelo Prensa-chapas

A pressão exercida pelo prensa-chapas foi calculada através da Equação 9, onde $\beta = 2,01$ (relação de estampagem obtida no Ensaio Swift). A resistência máxima (R_m) utilizada na equação foi obtida através dos cálculos do Apêndice E. Assim, substituindo estes valores na equação, a pressão exercida pelo prensa-chapas resultou no valor de $0,4 \text{ N/mm}^2$, discordando de Rodrigues e Martins (2010), uma vez que os autores apresentam que a força exercida pelo prensa-chapas para o alumínio pode variar de $0,80$ a $1,40 \text{ N/mm}^2$.

Determinou-se a força de estampagem através da Equação 10, onde $\beta = 2,01$ (relação de estampagem obtida no Ensaio Swift). A tensão de escoamento média no primeiro estágio (k_{fm_1}) utilizada na equação também foi obtida através dos cálculos do Apêndice E. Através das devidas substituições na equação, determinou-se o valor para a força de estampagem de 11.258 N .

5 CONCLUSÕES

No Ensaio Erichsen verificou-se que a lubrificação não teve influência significativa, visto que com lubrificação o Índice Erichsen de Embutimento (IE) resultou no valor de $10,2 \pm 0,06$ mm e, sem lubrificação, o valor obtido foi de $9,5 \pm 0,12$ mm. Notou-se que a lubrificação influencia na variação dos valores obtidos, ou seja, utilizando lubrificante obtém-se um desvio padrão menor. Os valores obtidos no ensaio aproximaram-se dos valores teóricos da literatura, segundo Akrouit et al. (2008), os valores para três diferentes ligas de alumínio de mesmas espessuras e sem lubrificação variaram de 9,1 a 9,8 mm.

Através de ensaios de tração foi possível determinar algumas propriedades mecânicas inerentes ao material, como: tensão de escoamento (σ_e), resistência máxima (R_m), alongamento máximo (Δl), constante C do material utilizada nas curvas de escoamento ($C = 191,24$), índice de encruamento ($n = 0,2920$), índice de anisotropia normal médio ($r_m = 0,62$) e índice de anisotropia planar ($\Delta r = - 0,18$).

Os valores correspondentes à tensão de escoamento, à resistência máxima e ao alongamento máximo (Δl) aproximaram-se dos valores apresentados pelo certificado de qualidade da liga de alumínio. Os valores do certificado de qualidade são, respectivamente, 38 MPa, 85 MPa e 38 %. O índice de encruamento (n) do material, obtido através das curvas de escoamento geradas nos ensaios de tração, aproximou dos valores propostos pela literatura. Segundo Siegert e Wagner (2010), o índice de encruamento (n) para ligas de alumínio pode variar de 0,22 a 0,31.

A curva de escoamento da liga de alumínio 1100, determinada através dos gráficos e das médias para os índices de encruamento e para a constante C do material, resultou em $k_f = 191,24 \cdot \varphi^{0,2920}$.

Através do Ensaio Swift determinou-se a relação de estampagem (β) do material. Verificou-se que o efeito do lubrificante neste ensaio não apresentou grande influência, visto que com lubrificação obteve-se uma relação de estampagem $\beta = 2,01$ e sem lubrificação a relação de estampagem resultou em $\beta = 1,90$.

O valor obtido para a relação de estampagem ($\beta = 2,01$) no Ensaio Swift encontrou-se dentro da faixa estipulada pela literatura. Rodrigues e Martins (2010) apresentam uma faixa de variação para β de 1,67 a 1,89, Siegert e Wagner (2010) indicam uma faixa de variação para β de 2,08 a 2,1.

A literatura apresenta que materiais com $r < 1$ não apresentam boa estampabilidade. Segundo Siegert e Wagner (2010) os valores de r_m para ligas de alumínio podem variar de 0,56 a 0,85 e, de acordo com Rodrigues e Martins (2010) os valores de r_m para estampagem do alumínio variam de 0,5 a 1,0.

Através do Ensaio Swift e do coeficiente de anisotropia planar verificou-se o fenômeno de 'orelhamento' na estampagem. Foi possível comprovar que materiais que possuem $\Delta r < 1,0$ apresentam formação de 'orelhas' a 45° e 135°.

Verificou-se também o comportamento da variação de espessura de um corpo-de-prova utilizado no Ensaio Swift. Confirmou-se o que a literatura indica, ou seja, ocorreu um aumento de espessura na região superior do corpo-de-prova, e uma redução maior de espessura na região do canto do punção. Pôde ser observado que na parede lateral do corpo-de-prova houveram pequenas variações de espessura, pois segundo Rodrigues e Martins (2010), isto ocorre devido ao estiramento uniforme que há nesta região.

Por meio dos cálculos teóricos disponibilizados pela literatura, o Cadinho de Aquecimento Controlado não poderia ser estampado em uma só operação, visto que $\beta_{adm} = 1,88 < \beta_{CAC} = 1,93$. Considerando a relação de estampagem real do material, obtida através do Ensaio Swift e com lubrificação, foi possível validar o número de operações necessárias sob condições reais de conformação, isto é, será necessária apenas uma operação de estampagem para o componente, visto que $\beta = 2,01 > \beta_{CAC} = 1,93$.

Por meio do levantamento bibliográfico realizado, foram definidos os parâmetros utilizados no processo e a geometria da ferramenta de conformação do Cadinho de Aquecimento Controlado, minimizando o típico procedimento de tentativa e erro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. Alumínio. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em: 27 de abril de 2014, 18:23.

ABAL. Alumínio. Disponível em: <http://www.abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/laminacao/>. Acesso em: 08 de novembro de 2014, 13:25.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5902**: Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen modificado. ABNT, 1980. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7549**: Alumínio e suas ligas - produtos laminados, extrudados e fundidos - ensaio de tração. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. iv, 24 p.

AKROUT, M.; BEM AMAR, M.; CHAKER, C.; DAMMAK, F.. Numerical and experimental study of the Erichsen test for metal stamping. **Advances in Production Engineering & Management**, v. 3, n. 2, p. 81-92, 2008.

BASTOS, Alexandre Lundgren. **Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação**. 2009. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2009.

BOFF, U.; FOLLE, L.F.; MORAES, A.S.; SCHAEFFER, L.. Ensaio de compressão é adequado para obter curvas de escoamento em chapas finas. **Corte e Conformação de Metais**, ano VII, São Paulo, n. 81, p. 76-87, 2012.

CHEMIN FILHO, R. A. **Avaliação das deformações de Chapas Finas e Curvas CLC para Diferentes Geometrias de Punções**. 2004. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

DIETER, George E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653 p.

FERRARINI, José Luiz. **Caracterização de materiais para o processo de Estampagem**. 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2004.

FOLLE, L.; ARRUDA, R. P.; MARCA, D.; SCHAEFFER, L.. Escolha do lubrificante correto torna mais precisa a curva limite de conformação. **Corte e Conformação de Metais**, v. 3, p. 64-76, 2008.

FOLLE, Luís Fernando. **Estudo do coeficiente de atrito para processos de estampagem**. 2012. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2012.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 247 p.

LORA, Fabio Andre. **Avaliação do processo de estampagem profunda de chapas de aço BH 180 e BH 220 utilizado na indústria automobilística**. 2009. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2009.

NETTO, Sergio Eglan Silveira. **Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação**. 2004. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2004.

OLIVEIRA, Antônio Fabiano de. **Caracterização de um aço IF após relaminação no laminador de encruamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2010.

OTOMAR, Heber Pires. **Estudo comparativo da estampabilidade da liga de alumínio AA1050 partindo de placas obtidas por vazamento direto e bobinas obtidas por vazamento contínuo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2010.

ÖZEK, Cebeli; BAL, Muhammet. The effect of die/blank holder and punch radiuses on limit drawing ratio in angular deep-drawing dies. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 40, n. 11-12, p. 1077-1083, 2009.

PINHEIRO, Bruno Lopes; RODRIGUES, Paulo César de Matos; ABRÃO, Alexandre Mendes. **Desenvolvimento de ferramental para a realização do Ensaio de Swift em uma máquina universal**. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2010.

PINHEIRO, B. L.; MIGUEL, A. T. G.; RODRIGUES, P. C. M.; ABRÃO, A.M.. **Influência do processo de fabricação de matrizes sobre a força da operação de estampagem**. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, Penedo, Itatiaia, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

REDDY, R. Venkat; REDDY, T.A. Janardhan; REDDY, G.C.M. Effect of Various Parameters on the Wrinkling In Deep Drawing Cylindrical Cups. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, Volume 3, n. 1-2012, p. 53-58.

RODRIGUES, Jorge; MARTINS, Paulo. **Tecnologia mecânica: tecnologia da deformação plástica**. 2. ed. Lisboa, PO: Escolar, 2010. 2 v.

SCHAEFFER, Lírio. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre Editora Ltda, 2004.193 p.

SCHAEFFER, Lírio. Fundamentos do projeto de ferramentas para o processo de estampagem. **Corte e Conformação**, Porto Alegre, n. 11, p. 31-36, 2006.

SIEGERT, K.; WAGNER, S.. **TALAT Lecture 3701: Formability Characteristics of Aluminium Sheet**, 2010.

SIMÕES, Vasco Manuel Neto. **Analysis of the influence of process parameters in the deep drawing of a cylindrical cup**. 2012. 68 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra, 2012.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: 1982. Editora Blücher, 286 p.

TIGRINHO, Luiz Maurício Valente. **Influência da lubrificação na estampagem via análise das deformações obtidas em uma chapa de aço de alta estampabilidade**. 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curitiba, 2005.

TIGRINHO, L. M. V.; DOS SANTOS, R. A.; CHEMIN FILHO, R. A.; MARCONDES, P. V. P.. Experimental investigation on the influence of the lubricant type in the punch stretching of extra deep-drawing steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 30, n. 4, p. 290-294, 2008.

TIGRINHO, Luiz Maurício Valente. **Análise da fratura de chapas do aço avançado de alta resistência DP600 quando submetido a diferentes estados de tensões**. 2011. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curitiba, 2011.

TORRES DE OLIVEIRA, Janaina da Costa Pereira; PADILHA, Angelo Fernando. Caracterização microestrutural dos alumínios comerciais AA1100, AA1050 e AA1070 e do alumínio superpuro AA1199. **Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 3, p. 373-378, 2009.

VERMA, Rahul K.; CHANDRA, Sanjay. An improved model for predicting limiting drawing ratio. **Journal of materials processing technology**, v. 172, n. 2, p. 218-224, 2006.

**APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO SWIFT PARA
DETERMINAÇÃO DO β**

Tabela 8 – Resultados para a relação de estampagem (β)

	Ø Disco (mm)	Comportamento	β
Com Lubrificação	85,0	Sucesso	1,70
	90,0	Sucesso	1,80
	100,0	Sucesso	2,00
	100,5	Sucesso	2,01
	101,0	Falha	2,02
	102,0	Falha	2,04
	103,0	Falha	2,06
	104,0	Falha	2,08
	105,0	Falha	2,10
Sem Lubrificação	76,0	Sucesso	1,52
	80,0	Sucesso	1,60
	81,0	Sucesso	1,62
	82,0	Sucesso	1,64
	83,0	Sucesso	1,66
	84,0	Sucesso	1,68
	85,0	Sucesso	1,70
	90,0	Sucesso	1,80
	95,0	Sucesso	1,90
	96,0	Falha	1,92

Fonte: Scopel (2014)

APÊNDICE B – CÁLCULOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA FERRAMENTA DE ESTAMPAGEM PROFUNDA

Número de Operações Necessárias

Relação de estampagem admissível (Equação 14):

$$\beta_{adm} = 2 - \frac{1,1 \cdot d_p}{1000 \cdot s_0} \quad \beta_{adm} = 2 - \frac{1,1 \cdot 103,8}{1000 \cdot 1,0} \quad \beta_{adm} = 1,88$$

Relação de estampagem do Cadinho de Aquecimento Controlado (Equação 8):

$$\beta = LDR = \frac{D_0}{d_p} \quad \beta = \frac{200}{103,8} \quad \beta = 1,93$$

Determinação da Geratriz

Utilizando a Equação 13:

$$D'_0 = \sqrt{d_p^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h_1} \quad D'_0 = \sqrt{103,8^2 + 4 \cdot 120 \cdot 66} \quad D'_0 = 206,00 \text{ mm}$$

Através da igualdade entre a área da chapa inicial e final:

$$\frac{\pi \cdot D''_0^2}{4} = 31,6 \quad D''_0 = 200,50 \text{ mm} \quad D''_0 \cong 200,00 \text{ mm}$$

Raio do Canto da Matriz

Para uma primeira operação de estampagem (Equação 11):

$$r_{cm} = 0,6 \sqrt{(D_0 - d_p) \cdot s_0} \quad r_{cm} = 0,6 \sqrt{(200 - 103,8) \cdot 1,0} \quad r_{cm} \cong 6,00 \text{ mm}$$

Diâmetro da Matriz

Folga entre o punção e a matriz (Equação 12):

$$w = s \sqrt{\frac{D_0}{d_p}} \quad w = 1,0 \cdot \sqrt{\frac{200}{103,8}} \quad w \cong 1,40 \text{ mm}$$

O diâmetro da matriz pôde ser determinado através da seguinte relação matemática:

$$d_m = d_p + 2 \cdot w \quad d_m = 103,8 + 2 \cdot 1,40 \quad d_m = 106,6 \text{ mm}$$

Pressão Exercida pelo Prensa-chapas

Utilizando a Equação 9:

$$P_{pc} = 0,0025 \left[(\beta - 1)^2 + 0,5 \cdot \frac{d_p}{100 \cdot s_0} \right] \cdot R_m$$

$$P_{pc} = 0,0025 \left[(2,01 - 1)^2 + 0,5 \cdot \frac{103,8}{100 \cdot 1,0} \right] \cdot 95,05 \quad P_{pc} = 0,4 \text{ N/mm}^2$$

Força de Estampagem

Utilizando a Equação 10:

$$F_1 = 5 \cdot d_p \cdot s_0 \cdot Kf m_1 \cdot \ln \beta$$

$$F_1 = 5 \cdot 103,8 \cdot 1,0 \cdot 31,07 \cdot \ln 2,01 \quad F_1 = 11.258 \text{ N}$$

APÊNDICE C – CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNCIDE DE ANISOTROPIA

Tabela 9 – Medidas realizadas antes do ensaio de tração

Direção de laminação	b ₀₁ (mm)	b ₀₂ (mm)	b ₀₃ (mm)	Média b ₀ (mm)	L ₀ (mm)
0°	19,76	19,79	19,79	19,69	100,00
	19,60	19,60	19,59		
45°	19,65	19,64	19,62	19,62	
	19,60	19,57	19,62		
90°	19,63	19,63	19,62	19,60	
	19,57	19,57	19,58		

Fonte: Scopel (2014)

Tabela 10 – Medidas realizadas após o ensaio de tração

Direção de laminação	b ₁₁ (mm)	b ₁₂ (mm)	b ₁₃ (mm)	Média b ₁ (mm)	L ₁ (mm)	Média L ₁ (mm)
0°	18,58	18,45	18,53	18,44	118,30	118,79
	18,54	18,24	18,27		119,28	
45°	18,48	18,24	18,13	18,30	119,14	118,30
	18,50	18,37	18,10		117,45	
90°	18,62	18,60	18,56	18,57	118,48	118,86
	18,54	18,52	18,56		119,23	

Fonte: Scopel (2014)

Cálculos dos coeficientes de anisotropia r_{0°}, r_{45°} e r_{90°} através da Equação 5

$$r_{0^\circ} = \frac{\ln\left(\frac{18,44}{19,69}\right)}{\ln\left(\frac{19,69 \cdot 100}{18,44 \cdot 118,79}\right)} \quad r_{0^\circ} = 0,61$$

$$r_{45^\circ} = \frac{\ln\left(\frac{18,30}{19,62}\right)}{\ln\left(\frac{19,62 \cdot 100}{18,30 \cdot 118,30}\right)} \quad r_{45^\circ} = 0,71$$

$$r_{90^\circ} = \frac{\ln\left(\frac{18,57}{19,60}\right)}{\ln\left(\frac{19,60 \cdot 100}{18,57 \cdot 118,86}\right)} \quad r_{90^\circ} = 0,45$$

Cálculos do coeficiente de anisotropia planar (Δr) através da Equação 6

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ}$$

$$\Delta r = \frac{0,61 + 0,45}{2} - 0,71$$

$$\Delta r = -0,18$$

Cálculos do coeficiente de anisotropia planar médio (r_m) através da Equação 7

$$r_m = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + r_{90^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ})$$

$$r_m = \frac{1}{4}(0,61 + 0,45 + 2 \cdot 0,71)$$

$$r_m = 0,62$$

**APÊNDICE D – CURVAS DE ESCOAMENTO OBTIDAS NOS GRÁFICOS PARA
OS SEIS CORPOS-DE-PROVA**

Direção de Laminação – 90°

Corpo-de-prova 1

$$y = 184,14 \cdot x^{0,2881}$$

Corpo-de-prova 2

$$y = 186,47x^{0,2935}$$

Direção de Laminação – 45°

Corpo-de-prova 3

$$y = 190,71 \cdot x^{0,2912}$$

Corpo-de-prova 5

$$y = 190,97x^{0,2927}$$

Direção de Laminação – 0°

Corpo-de-prova 7

$$y = 197,18 \cdot x^{0,2932}$$

Corpo-de-prova 8

$$y = 198,78x^{0,2934}$$

APÊNDICE E – CÁLCULOS DAS MÉDIAS PARA DEFINIÇÃO DA CURVA DE ESCOAMENTO DO ALUMÍNIO 1100

Tabela 11 – Médias dos índices de encruamento (n) e das constantes (C) obtidos nas curvas de escoamento

Direção de Laminação	n	Média n	C	Média C
0°	0,2932	0,2933	197,18	197,98
	0,2934		198,78	
45°	0,2927	0,2920	190,97	190,84
	0,2912		190,71	
90°	0,2881	0,2908	184,14	185,31
	0,2935		186,47	

Fonte: Scopel (2014)

Utilizando a Equação 7:

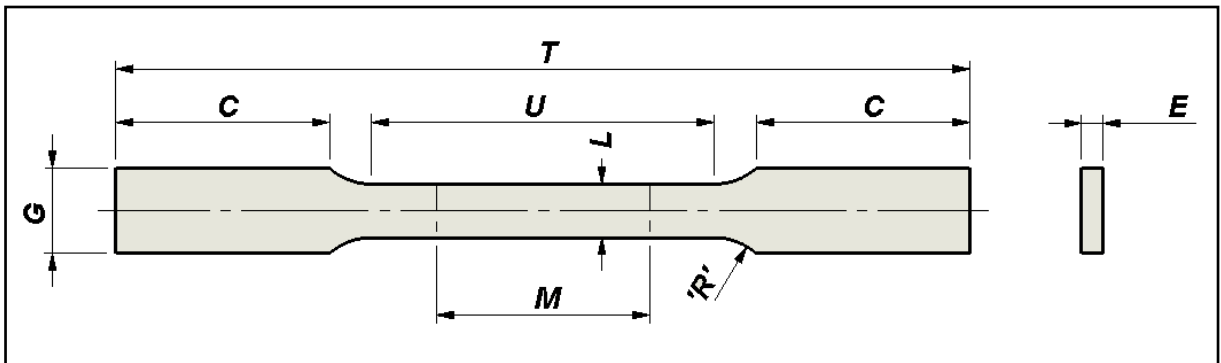
$$C = \frac{1}{4}(C_{0^\circ} + C_{90^\circ} + 2 \cdot C_{45^\circ})$$

$$C = \frac{1}{4}(197,98 + 185,31 + 2 \cdot 190,84) \quad C = 191,24$$

$$n = \frac{1}{4}(n_{0^\circ} + n_{90^\circ} + 2 \cdot n_{45^\circ})$$

$$n = \frac{1}{4}(0,2933 + 0,2908 + 2 \cdot 0,2920) \quad n = 0,2920$$

ANEXO A – CORPO-DE-PROVA DE SEÇÃO RETANGULAR PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7549 (2008)

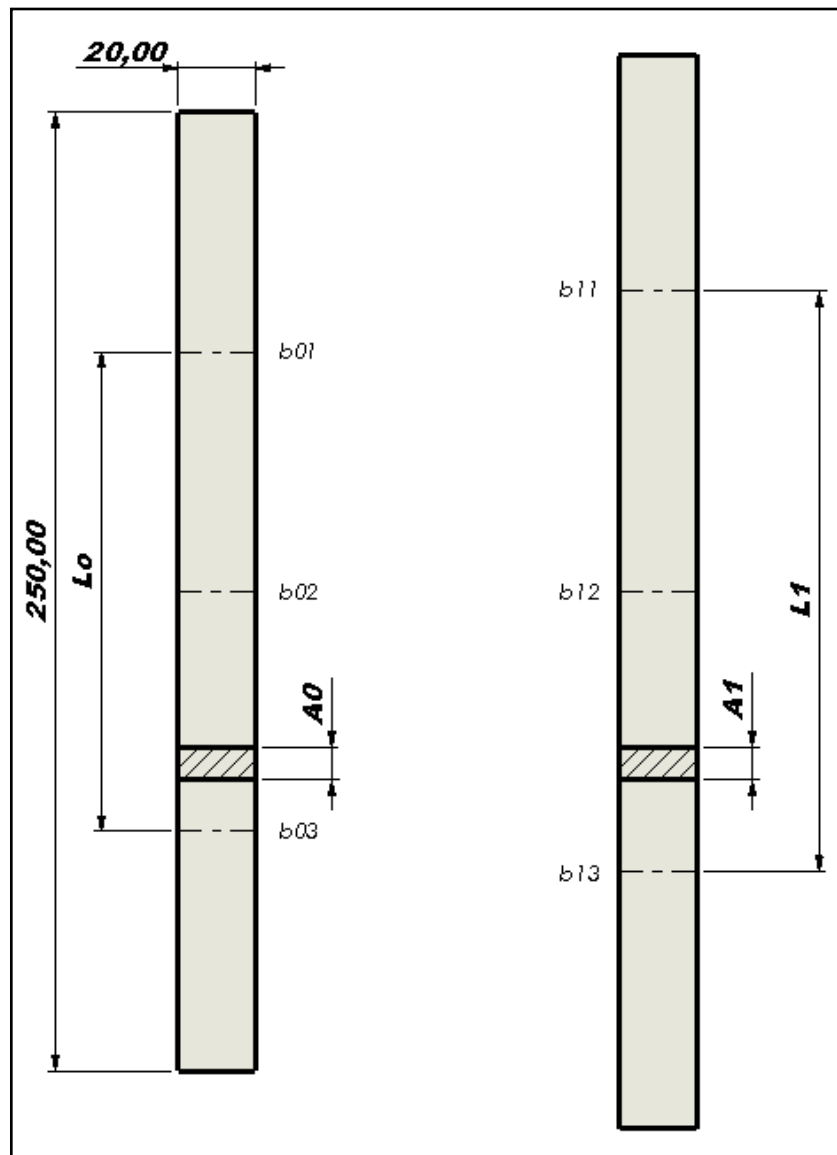
A Tabela 12 apresenta as dimensões, em milímetros, das cotas indicadas no anexo A.

Tabela 12 – Dimensões dos corpos-de-prova de seção retangular

COTA	DIMENSÕES (mm)
Comprimento mínimo das cabeças (C)	50
Espessura (E)	Espessura do material
Largura aproximada das cabeças (G)	20
Largura (L)	$12,50 \pm 0,25$
Comprimento entre marcas (M)	$50,00 \pm 0,10$
Raio mínimo de concordância (R)	12,5
Comprimento total mínimo (T)	200
Comprimento útil mínimo (U)	57

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7549 (2008)

ANEXO B – CORPO-DE-PROVA PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ANISOTROPIA



Fonte: Adaptado de Schaeffer (2004)