

**LAURO FELIPE DE ARAÚJO NETO**

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE AÇO  
INOX 430 UTILIZANDO FERRAMENTA DE PONTA  
SEMIESFÉRICA VARIANDO O FLUIDO LUBRI-  
REFRIGERANTE**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2018**

**LAURO FELIPE DE ARAÚJO NETO**

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE AÇO INOX 430  
UTILIZANDO FERRAMENTA DE PONTA SEMIESFÉRICA VARIANDO  
O FLUIDO LUBRI-REFRIGENTE**

**Trabalho de Conclusão de Curso**  
apresentado à Faculdade de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal de  
Uberlândia como requisito parcial para a  
obtenção do título de **BACHAREL EM  
ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de concentração: Materiais e  
Processor de Fabricação

**Orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales**

**UBERLÂNDIA - MG**

**2018**

# LAURO FELIPE DE ARAÚJO NETO

## ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE AÇO INOX 430 UTILIZANDO FERRAMENTA DE PONTA SEMIESFÉRICA VARIANDO O FLUIDO LUBRI-REFRIGENTE

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Banca de Avaliação:

---

Prof. Dr. Wisley Falco Sales – FEMEC/UFU Orientador

---

Prof. M. Sc. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva – FEMEC/UFU Membro da Banca

---

Prof. Dr. Éder Silva Costa – ESTES/FEMEC/UFU Membro da Banca

**Uberlândia, 6 de agosto de 2018.**

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar o processo de estampagem incremental, na conformação em peças de aço AISI 430 com espessura de 0,5 mm, visando o entendimento do processo, favorecendo a implementação do mesmo ao Laboratório de Ensino e Pesquisa de Usinagem – LEPU. Foram realizados quatro ensaios experimentais com os recursos: dispositivo prensa-chapas, software CAD/CAM, centro de usinagem CNC com três eixos, ferramenta de ponta semiesférica e fluidos lubrificantes. Foram realizados ensaios com uso dos lubrificantes: óleo Lubrax SAE 10w30, vaselina Orbi Spray 5315, graxa grafitada Lubrax Calcium, e um ensaio sem o uso de lubrificante. Conclui-se que com o uso dos lubrificantes o aço AISI 430 apresenta boa conformabilidade, sendo necessário a utilização de lubrificação para conseguir melhores resultados.

**Palavras-chave:** estampagem incremental, conformação, aço AISI 430, lubrificação.

## ABSTRACT

The objective of this work is to study the incremental stamping process in the conformation of AISI 430 steel pieces with a thickness of 0.5 mm, aiming at understanding the process, favoring the implementation of the same to the Laboratory of Teaching and Research of Machining - LEPU. Four experimental tests were carried out with the following resources: press-sheet device, CAD / CAM software, CNC machining center with three axes, spherical tool and lubricating fluids. Tests were performed using lubricants: Lubrax SAE 10w30 oil, Orbi Spray 5315 Vaseline, Lubrax Calcium graphite grease, and a non-lubricant test. It is concluded that with the use of lubricants the AISI 430 steel presents good formability, being necessary the use of lubrication to achieve better results.

**Keywords:** incremental stamping, forming, AISI 430 steel, lubrication.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAD: Computer Aided Design – Projeto Assistido por Computador

CAM: Computer Aided Manufacturing

CLC: Curva Limite de Conformação

CNC: Computer Numeric Control - Controle Numérico Computadorizado

CrN: Nitreto de Cromo

EP: Extreme Pressure

ISF: Incremental Sheet Forming - Estampagem Incremental de Chapas

MoS<sub>2</sub>: Bissulfeto de Molibdênio

TiN: Nitreto de Titânio

TiCN: Carbonitreto de Titânio

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo de Estampagem Incremental por CNC (KIM et al, 2002).

Figura 2.1 - Dimensões esquemáticas em um ensaio de tração (SCHARFFER, 2004).

Figura 2.2 - Exemplo de deformações que ocorrem em uma peça estampada (CAVALER, 2010).

Figura 2.3 - Medição prática da deformação, (a) círculo inicial, (b) círculo após a deformação – elipse (CAVALER, 2010).

Figura 2.4 - Deformações em diferentes posições em uma linha de uma peça estampada (LANGE, 1993).

Figura 2.5 - Corpo de prova para o ensaio de tração, dimensões em mm (ABNT NBR-6152, 1992).

Figura 2.6 - Curva tensão-deformação. Adaptado (DIETER, 1981).

Figura 2.7 - CLC e a janela de conformação (HOLMBERG et al, 2003).

Figura 2.8 - Caracterização do parâmetro Ra (BET, 1999).

Figura 2.9 - Caracterização do parâmetro Rt (BET, 1999).

Figura 2.10 - Caracterização do parâmetro Rz, segundo a norma DIN 4768 (KÖNIG, 1981).

Figura 2.11 - Variantes do processo de Estampagem Incremental de Chapas: a - Estampagem com Ponto Simples, b - Estampagem NC sem Matriz (HIRT et al., 2003).

Figura 2.12 - Estampagem de ponto simples (HIRT et al., 2003).

Figura 2.13 - Rugosidade Rz sob condições de estampagem padrão (JUNK et al., 2003).

Figura 2.14 - Redução da espessura de parede (JUNK et al., 2003).

Figura 2.15 - Aplicações recentes da ISF (KOPAC; KAMPUS, 2005).

Figura 2.16 - Etapas de estampagem de prótese craniana (CASTELAN, 2010).

Figura 2.17 - Ferramenta de ponta esférica (ISEKI; NAGANAWA, 2002).

Figura 2.18 - Conceito inicial do dispositivo prensa-chapas (SILVA FILHO, 2005).

Figura 3.1 - Chapas de aço AISI 430 utilizadas nos testes

Figura 3.2 - Ferramenta de ponta esférica de aço.

Figura 3.3 - Centro de Usinagem Romi Discovery 760.

Figura 3.4 - Suporte para fixação de chapas para realizar testes de estampagem incremental

Figura 3.5 - Geometria gerado em software CAD/CAM

Figura 3.6 - a) Teste sem lubrificante, b) Teste com graxa grafitada, c) Teste com vaselina.

Figura 3.7 - Peça encaixada para realizar corte de amostra em serra elétrica.

Figura 4.1 - Resultado do ensaio de estampagem incremental com graxa grafitada Lubrax Calcium.

Figura 4.2 - Resultado do ensaio de estampagem incremental com óleo Lubrax SAE 10w30.

Figura 4.3 - Resultado do ensaio de estampagem incremental sem lubrificante em chapa de aço Inox 430.

Figura 4.4 - Resultado do ensaio de estampagem incremental com vaselina em spray.

Figura 4.5 - Curva tensão x deformação para ângulo de laminação de 0°.

Figura 4.6 - Curva tensão x deformação para ângulo de laminação de 45°.

Figura 4.7 - Curva tensão x deformação para ângulo de laminação de 90°.

Figura 4.10 - Valores obtidos de Rq.

Figura 4.11 - Valores obtidos de Rt.

Figura 4.12 - Valores obtidos de Ra.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Medidas lineares dos corpos de prova antes e após o ensaio de tração.

Tabela 4.2 – Índice de anisotropia  $r$ .

Tabela 4.3 – Anisotropia média e planar.

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo.....	2
1.1.1. Objetivo geral.....	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	2
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>3</b>
2.1. Estudo geral do processo de estampagem.....	3
2.1.1. Tensão.....	3
2.1.2. Deformação.....	3
2.1.3. Ensaio de tração e curva de escoamento.....	7
2.1.4. Índice de anisotropia.....	9
2.1.5. Curva limite de conformação.....	10
2.1.6. Rugosidade.....	12
2.2. Estampagem Incremental de Chapas.....	13
2.2.1. Processo de Estampagem Incremental.....	14
2.2.2. Parâmetros importantes na Estampagem Incremental .....	16
2.2.3. Passo vertical.....	16
2.2.4. Limitações e aplicações do processo.....	17
2.3. Aço Inoxidável AISI 430.....	19
2.4. Ferramenta para Estampagem Incremental.....	20
2.5. Configuração do suporte prensa-chapa.....	22
2.6. Lubrificação.....	26
<b>3. Metodologia.....</b>	<b>25</b>
3.2. Chapas.....	26
3.3. Características da ferramenta.....	26
3.4. Centro de usinagem.....	27
3.5. Configuração do suporte prensa-chapa.....	27
3.6. Geometria da peça.....	28
3.7. Lubrificação.....	28
3.8. Chapas para teste de rugosidade.....	29
<b>4. Resultados e Discussões.....</b>	<b>29</b>
4.2. Resultado dos ensaios de Estampagem Incremental.....	29
4.3. Ensaio de Tração.....	32
4.4. Testes de rugosidade.....	33
4.5. Índice de anisotropia.....	35
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>36</b>
<b>6. Referência bibliográfica.....</b>	<b>37</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As indústrias de estampagem de chapas metálicas usam diferentes métodos de conformação, os quais são baseados no uso de ferramentas com geometria precisa para as peças fabricadas. Estes métodos são normalmente empregados para produção em massa, desde que os custos destas matrizes possam ser diluídos em um grande número de peças fabricadas. Mas quando séries pequenas são exigidas, os métodos convencionais de estampagem baseados em matrizes podem ser substituídos por novos métodos, desenvolvidos com objetivo de cumprir os requisitos impostos pelas indústrias que produzem pequenos lotes (CERRO et al., 2006).

Um novo método que pode substituir em parte a estampagem tradicional de chapas metálicas é a Estampagem Incremental de Chapas (ISF – Incremental Sheet Forming). O processo consiste na conformação de um geratriz, com precisão razoável, a partir de arquivos de CAD (Computer Aided Design – Projeto Assistido por Computador) convertidos em arquivos de CAM (Computer Aided Manufacturing) em três dimensões. A trajetória da ferramenta é controlada por um programa, utilizando uma CNC (Computer Numeric Control – Controle Numérico Computadorizado), aplicando sucessivas deformações localmente (PARK, KIN, 2003; SCHAEFFER, 2004).

Para exemplificar o procedimento, uma ferramenta de ponta esférica movimenta-se através de um percurso programado e executado por um centro de usinagem CNC, sobre uma chapa que é fixada e centrada através de parafusos em uma prensa-chapa de seção central vazada, conforme a Fig. 1.1.

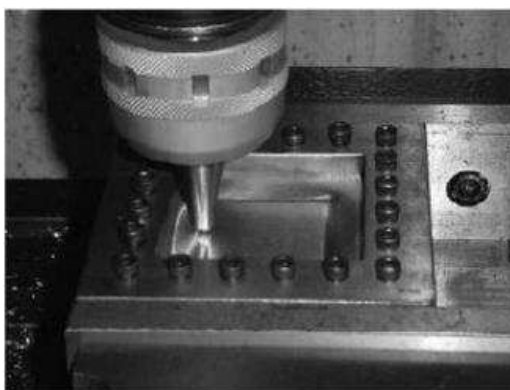


Figura 1.1 – Exemplo de Estampagem Incremental por CNC (KIM et al, 2002)

O uso de lubrificantes no processo de estampagem incremental pode ser um parâmetro diferencial, dado que as forças de conformação podem ser alteradas devido a aspectos tribológicos, e isso que será estudado nessa pesquisa. Por tanto é necessária uma revisão sobre lubrificantes, no caso óleo multiviscoso SAE 10w30, graxa grafitada e vaselina na forma de spray. É importante reconhecer as tensões residuais geradas pela estampagem.

A integridade da superfície deve ser entendida como a inexistência de quaisquer fatores que possam reduzir a resistência mecânica do produto em serviço, assim como também a inexistência de falhas que comprometam visualmente a aparência do produto, tornando-o inaceitável. Dentre os diversos fatores que podem comprometer a integridade superficial do produto podem ser atrelados a rugosidade, trincas e microtrincas, microdureza e tensões residuais. O efeito da lubrificação sobre a integridade das superfícies vem sendo estudado com certa ênfase para os processos de fabricação por usinagem (KANNAN, KISHAWY, 2008; RECH, at al., 2008).

## **1.1. Objetivo**

### 1.1.1. Objetivo geral

Auxiliar na implementação de um sistema que possibilite executar testes de conformação incremental de chapas, sendo assim, investigar a influência da lubricidade do par peça-ferramenta, no processo de estampagem incremental de chapas de aço Inox 430, utilizando óleo lubrificante com aditivos de extrema pressão, vaselina em spray, graxa grafitada e por último teste sem lubrificantes (contato direto).

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Entender e analisar o comportamento dos lubrificantes na estampagem incremental;
- Construir um suporte e ferramentas para os experimentos, aplicando as teorias aprendidas durante o curso, como usinagem, resistência dos materiais, mecânica dos materiais aplicada, tribologia, etc;
- Aprimorar a pratica de trabalhar em equipe.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Estudo geral do processo de estampagem

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica a respeito dos parâmetros fundamentais para entender o processo de estampagem incremental, como entender sobre a composição da matéria prima, do processo de forma geral, as tensões envolvidas, a rugosidade do produto final, e principalmente a influência da lubrificação durante o processo de estampagem. Os conhecimentos dos parâmetros (ex: tensão, deformação) são necessários para prever a forma do produto após a conformação, para a previsão de defeitos conjugados com a otimização do fluxo de material durante a fabricação e da previsão das propriedades mecânicas e sobre a qualidade do produto estampado.

#### 2.1.1. Tensão

A tensão  $\sigma$  é definida como sendo o quociente da força F em relação a área inicial A0, definido na Eq. (2.1):

$$\sigma = \pm \frac{F}{A_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.1)$$

O sinal positivo (+) é usado para representar tensões de tração e o sinal negativo (-) quando as tensões são de compressão. A tensão é um parâmetro fundamental na determinação de o quanto um material suporta durante a conformação (HIBELLER, R. C., 2010).

#### 2.1.2. Deformação

Existem diversas formas de caracterizar as deformações, como:

- Deformações absolutas;

- Deformações relativas;
- Deformações verdadeiras.

As principais geometrias em um ensaio de tração convencional, que serve para esclarecer as principais formas de definir as deformações estão mostradas na Fig. 2.1.

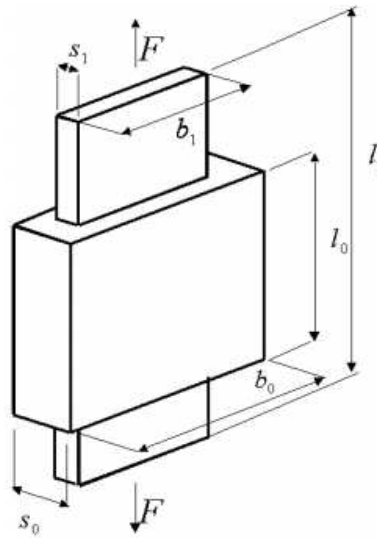


Figura 2.1 - Dimensões esquemáticas em um ensaio de tração (SCHAEFFER, 2004).

A deformação absoluta do comprimento é definida por  $\Delta l$ , na Eq. (2.2):

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad [\text{mm}] \quad (2.2)$$

A deformação absoluta da largura é definida por  $\Delta b$ , na Eq. (2.3):

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad [\text{mm}] \quad (2.3)$$

A deformação absoluta da espessura é definida por  $\Delta s$ , na Eq. (2.4):

$$\Delta s = s_1 - s_0 \quad [\text{mm}] \quad (2.4)$$

A deformação relativa do comprimento é definida por  $\epsilon_l$ , na Eq. (2.5):

$$\epsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.5)$$

A deformação relativa da largura é definida por  $\epsilon_b$ , na Eq. (2.6):

$$\epsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.6)$$

A deformação relativa da espessura é definida por  $\epsilon_s$ , na Eq. (2.7):

$$\epsilon_s = \frac{s_1 - s_0}{s_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.7)$$

A deformação verdadeira do comprimento é definida por  $\phi_l$ , na Eq. (2.8):

$$\phi_l = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2.8)$$

A deformação verdadeira da largura é definida por  $\phi_b$ , na Eq. (2.9):

$$\phi_b = \ln\left(\frac{b}{b_0}\right) \quad (2.9)$$

A deformação verdadeira da espessura é definida por  $\phi_s$ , na Eq. (2.10):

$$\phi_s = \ln\left(\frac{s}{s_0}\right) \quad (2.10)$$

Sendo:  $l_0$  [mm] o comprimento inicial,  $l_1$  (ou  $l$ ) [mm] o comprimento final,  $b_0$  [mm] a largura inicial,  $b_1$  (ou  $b$ ) [mm] a largura final,  $s_0$  [mm] a espessura inicial e  $s_1$  (ou  $s$ ) [mm] a espessura final.

As deformações verdadeiras são parâmetros usados na análise de processos de conformação, que revela a partir de outras análises a situação das tensões internas, possibilidades de reduzir etapas do processo, conhecimentos a respeito do limite máximo de deformações (SCHAEFFER, 2004).

Essas deformações variam de ponto a ponto no componente estampado, para análise delas são feitas gravações eletroquímica (grades circulares) antes do processo de estampagem, ilustrado na Fig. 2.2.



Figura 2.2 – Exemplo de deformações que ocorrem em uma peça estampada (CAVALER, 2010).

A Fig. 2.3 mostra um círculo esquemático colocado na geratriz. A elipse é a figura medida após a estampagem.

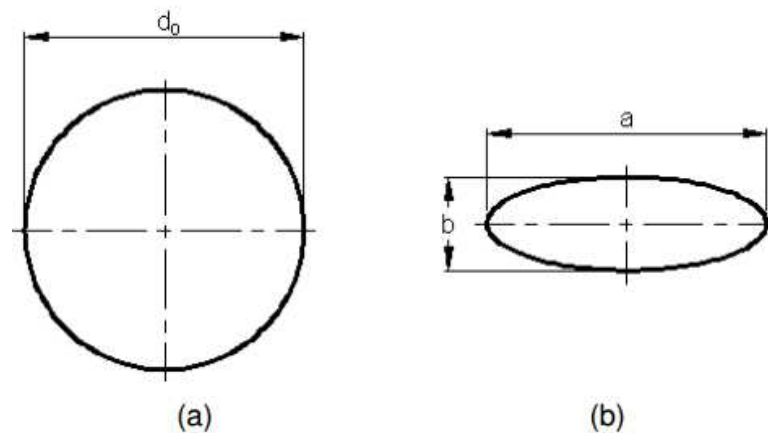


Figura 2.3 – Medição prática da deformação, (a) círculo inicial, (b) círculo após a deformação – elipse (CAVALER, 2010).

Neste caso as deformações principais são calculadas pelas Eq. (2.11) e (2.12):

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{d_0} \quad (2.11)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{b}{d_0} \quad (2.12)$$



As medições na rede deformada mostram uma relação entre as deformações. A figura 2.4 revela como podem ser classificadas as deformações em função das solicitações que ocorrem no decorrer da estampagem.

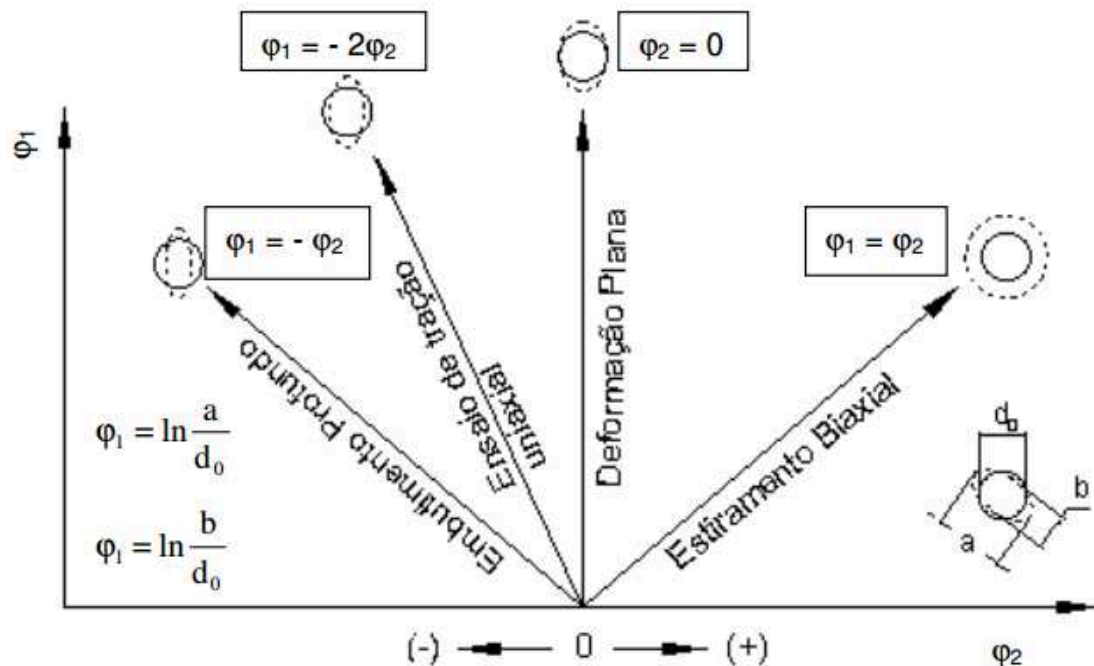


Figura 2.4 – Deformações em diferentes posições em uma linha de uma peça estampada (LANGE, 1993).

Mesmo após quantificado as deformações em um local não é possível afirmar o quanto essas deformações estão próximas do limite de deformação.

### 2.1.3. Ensaio de tração e curva de escoamento

O ensaio de tração é normalizado pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) 6152, o ensaio consiste na fixação de um corpo nos encaixes apropriados da máquina de ensaio, garantindo um estado uniaxial de tensões. Então a carga de tração uniaxial é aplicada lentamente no corpo de prova, de forma crescente, até a sua ruptura. Os resultados desses valores são muito influenciados pela variação da temperatura e velocidade de aplicação de carga durante o ensaio. (SILVA FILHO, 2005). A figura 2.5 exemplifica o corpo de prova segundo a norma ABNT 6152.

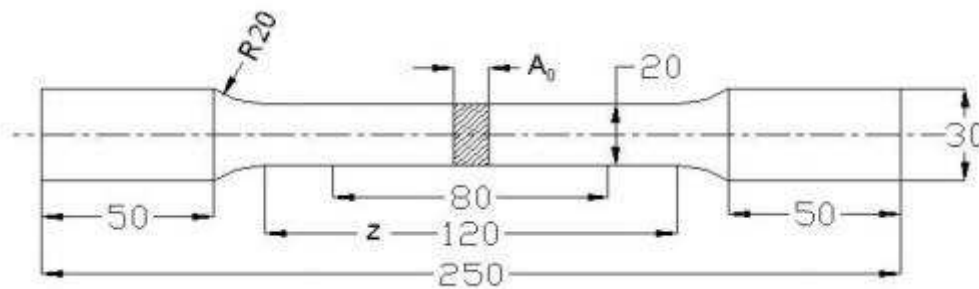


Figura 2.5 – Corpo de prova para o ensaio de tração, dimensões em mm (ABNT NBR-6152, 1992)

O ensaio de tração é o mais comum para definir algumas propriedades mecânicas, sendo possível obter (SCHAEFFER, 2004):

- Módulo de elasticidade;
- Tensão de escoamento;
- Limite de resistência tensão máxima;
- Limite de ruptura;
- Alongamento.

Com o ensaio de tração é possível construir o diagrama tensão versus deformação relativa, conforme a Fig. 2.6.

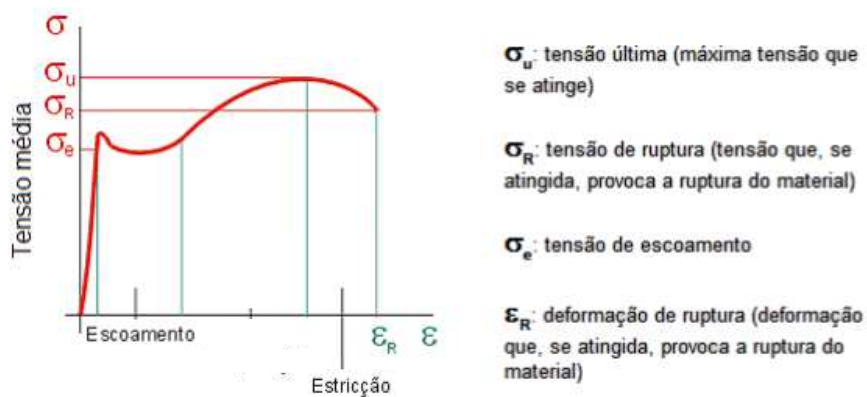


Figura 2.6 – Curva tensão-deformação. Adaptado (DIETER, 1981).

A tensão  $\sigma$  pode ser calculada pela Eq. (2.13):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.13)$$

Onde: F [N] a força aplicada e  $A_0$  [mm<sup>2</sup>] a área transversal inicial do corpo de prova.

A deformação relativa  $\varepsilon$  é calculada pela Eq. (2.14):

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.14)$$

Quando o material é submetido à tensão superior ao seu limite de escoamento, o mesmo sofre uma deformação plástica, não voltando ao seu formato original. A tensão para produzir uma nova deformação plástica é maior que a anterior, e assim sucessivamente. Essa propriedade é chamada de encruamento. O volume do corpo permanece constante durante a deformação plástica do ensaio de tração, e conforme ocorre o alongamento, a área da seção transversal decresce uniformemente ao longo do comprimento útil do corpo de prova. A curva tensão x deformação não mostra o real comportamento de cada parte da amostra. Analisando a curva, a tensão necessária para continuar a deformação da amostra parece estar decrescendo após a estrição, isso ocorre porque a tensão convencional retrata somente a mudança de carga, e não a mudança na área de secção transversal (DIETER, 1981).

#### 2.1.4. Índice de Anisotropia

As propriedades mecânicas de um material trabalhado mecanicamente podem variar segundo suas direções, esse fenômeno é chamado de anisotropia, e acontece por causa da orientação preferencial dos planos e direções cristalinas do metal após uma deformação por trabalho mecânico ou mesmo devido a inclusões, vazios ou segregações. O valor para avaliar a anisotropia é o índice de anisotropia R. Este índice é definido como a razão da deformação verdadeira na largura e a deformação verdadeira na espessura de um corpo padrão, de comprimento útil de 50 mm. Após a conformação, o valor de r é calculado na Eq. (2.15):

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{b_0 \cdot l_0}{b \cdot l}} \quad (2.15)$$

Onde:  $b_0$  e  $l_0$  são a largura e a espessura iniciais, respectivamente, e  $b$  e  $l$  são largura e espessuras finais.

Em geral toma-se o corpo de prova em várias direções em relação à direção de laminação, usualmente a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , obtendo  $r_{0^\circ}$ ,  $r_{45^\circ}$  e  $r_{90^\circ}$ . Considerando as direções de laminação da chapa, pode-se a partir das três razões de deformação calcular a anisotropia média e a anisotropia planar, respectivamente (SCHAEFFER, 1999), mostrado nas Eq. (2.16) e (2.17).

$$r_m = \frac{1}{4} \cdot (r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (2.16)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (2.17)$$

#### 2.1.5. Curva limite de conformação

O estudo da estampabilidade de chapas metálicas pode ser feito usando as curvas de limite de conformação (CLC). O conceito de CLC se fundamenta em um critério de falha empírico, baseado no par de medidas da maior,  $\epsilon_1$ , e menor,  $\epsilon_2$ , deformações principais em um ponto crítico de falha. Estas deformações são definidas como o ponto onde provavelmente uma fratura poderia ocorrer. Posteriormente este conceito foi estendido para valores negativos da menor deformação (WOODTROPHE, 1969; GOODWIN, 1971).

Entende-se então que uma CLC é um diagrama empiricamente construído, muito utilizado para descrever o ponto geométrico das deformações principais e críticas, que ocorrem na superfície da chapa, no qual a estrição localizada se torna visível ou ocorre à fratura. As CLC's são usadas para analisar o limite das deformações de um determinado material quando submetido aos diversos modos de deformação inerentes aos processos de conformação.

Para controlar as falhas mecânicas no processo, compara-se a distribuição das deformações nas peças com as CLC's do material, obtidas em laboratório. Este procedimento permite inferir se um determinado material está adequado para a peça final, tal como ajustar

adequadamente as condições de lubrificação e a geometria do ferramental adotado no processo (GHOSH, 1975).

Para evitar o acontecimento de fraturas ou estricções em uma determinada peça estampada, é muito importante que os níveis de deformação em todos os pontos desta peça estejam abaixo da CLC. É inserida uma margem de segurança, resultando no deslocamento imaginário da CLC para baixo. O risco de rompimento é determinado pela avaliação da proximidade das deformações da peça em relação a CLC (MARCINIAK, 2002). Porém, não é suficiente apenas a verificação dos riscos de rompimento quando se está definindo um processo de estampagem. Outros defeitos como afinamento excessivo, enrugamento ou estiramento insuficiente podem ser identificados através da CLC. Através da CLC é possível estabelecer uma “Janela de Conformação”, conforme mostrado na Fig. 2.7 (HOLMBERG et al, 2003).

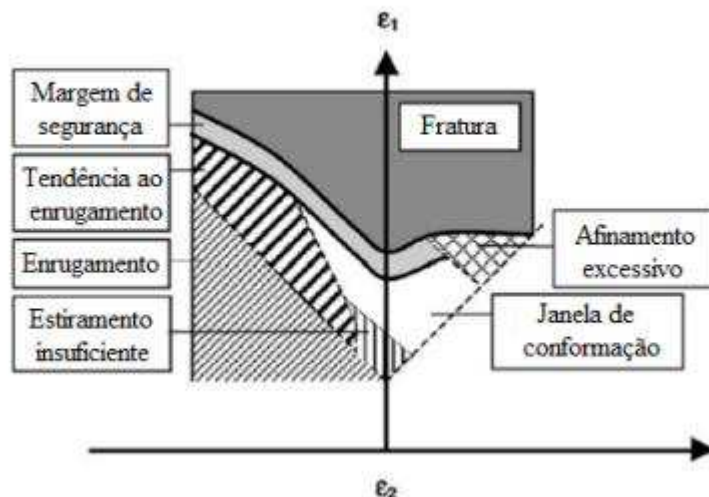


Figura 2.7 - CLC e a janela de conformação (HOLMBERG et al, 2003).

Fatores que influenciam a CLC cima (SILVEIRA NETTO, 2004):

- Quanto menor for o coeficiente de atrito entre punção e o corpo de prova, maiores serão as deformações e conseqüentemente a CLC será deslocada para cima.
- Corpos de prova preparados na direção de laminação apresentam maiores deformações e quando preparados na direção perpendicular à laminação apresentam menores deformações.
- Quanto menor a velocidade da punção, maior a capacidade do material ser deformado, elevando a CLC.

### 2.1.6. Rugosidade

Na fabricação de peças por estampagem não é possível produzir superfícies perfeitamente lisas. A superfície de uma peça é, se observada ao microscópio, dotada de regiões com maior ou menor planicidade que é definida como sendo rugosidade da peça, mesmo que estas peças, num aspecto macroscópico, sejam completamente lisas (KÖNIG, 1981). Para analisar a qualidade da superfície de uma peça existem os parâmetros de rugosidade, os mais utilizados pela indústria são: Ra, Rq e Rt.

Define-se Ra como o desvio médio aritmético, resumido como, a média dos valores absolutos das ordenadas do perfil em relação à linha média, num determinado comprimento de amostragem, na Fig. 2.8. Sendo:

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (2.20)$$

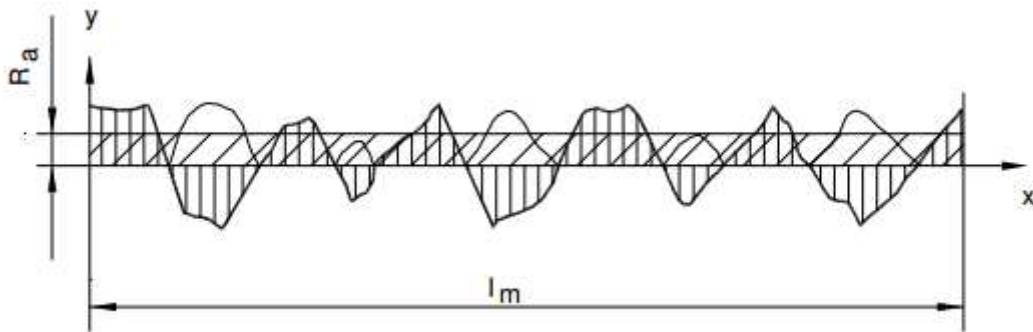


Figura 2.8 – Caracterização do parâmetro Ra (BET, 1999)

A profundidade de rugosidade Rt é definida como sendo a distância vertical entre o ponto mais alto e mais baixo do perfil filtrado, dentro do comprimento amostral total l\_m. (BET, 1999; KÖNIG, 1981). O parâmetro de rugosidade Rt está mostrado na Fig. 2.9.

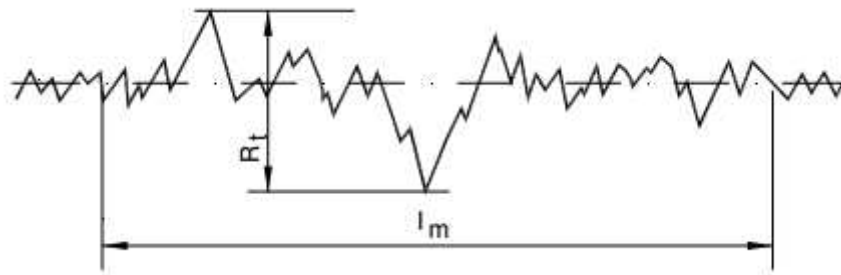


Figura 2.9 - Caracterização do parâmetro  $R_t$  (BET, 1999)

$R_q$  é o desvio médio da raiz quadrada do perfil avaliado, Fig. 2.10. A elevação ao quadrado aumenta o efeito das irregularidades que se afasta da média (KÖNIG, 1981). Sendo:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}} \quad (2.21)$$

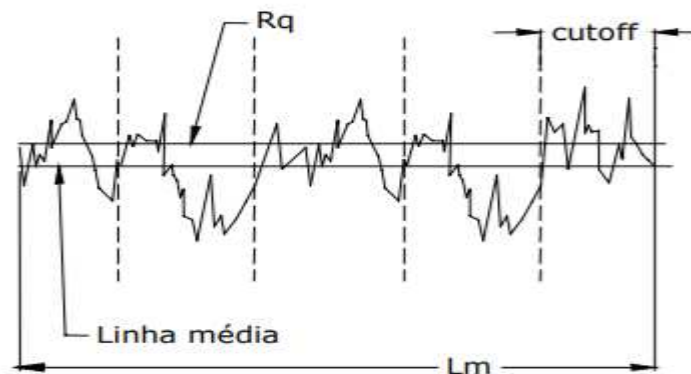


Figura 2.10 – Caracterização do parâmetro  $R_q$  (MACHADO, 2009) segundo a norma DIN 4768 (KÖNIG, 1981).

## 2.2. Estampagem Incremental de Chapas

A Estampagem Incremental de Chapas é processo de estampagem no qual a chapa é conformada por uma punção pontual comandada por CNC. A estampagem pode ser realizada com matriz bastante simplificada ou mesmo sem matriz, logo, o processo parece ser muito interessante para pequenos volumes de produção e prototipagem rápida de componentes de chapas.

As variações de ISF podem ser divididas dentro de duas categorias principais: estampagem de superfícies convexas ou superfícies côncavas JESWIET et al., 2001, estudou a aplicação da tecnologia de Estampagem Incremental CNC para formas não simétricas formada sobre superfícies côncavas. Neste processo a chapa permanece estacionária e a estampagem ocorre usando controle CNC da ferramenta.

A estampagem de superfície convexa foi a primeira variação da ISF. Conhecida como Estampagem NC sem Matriz (Dieless NC Process Forming), foi introduzida no Japão como um método para prototipagem e fabricação de produtos a partir de chapas de metal para pequenas séries. O método foi originalmente desenvolvido para as necessidades da indústria automobilística, porém agora é utilizada por outras indústrias também (LAMMINEN, 2005). A tecnologia Estampagem NC sem Matriz tem sido comercializada pela empresa japonesa Amino Corporation.

### 2.2.1. Processo de Estampagem Incremental

No processo o blank de metal é fixado em um suporte retangular, sendo formado por um movimento contínuo de uma ferramenta simples de estampar com ponta esférica. A trajetória da ferramenta é descrita em um programa computacional, sendo ela gerada por um programa modelado no CAD (computer Aided Design), do componente a ser conformado. Começando do ponto mais alto, a ferramenta percorre uma sequência ao longo das linhas de contorno com um passo vertical entre cada nível da trajetória da ferramenta. Existem algumas variantes para o processo, por exemplo, uma matriz positiva simplificada representando áreas críticas da superfície do componente a ser produzido pode ser fixado abaixo da chapa (Estampagem NC sem Matriz), ou a execução da estampagem com apenas um ponto de contato (Estampagem com Ponto Simples), que será o método utilizado para esta pesquisa. A Fig. 2.11 compara essas variações.



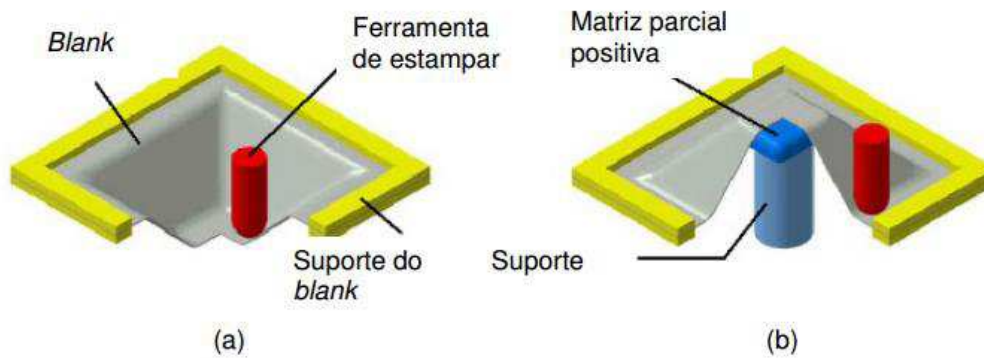


Figura 2.11 - Variantes do processo de Estampagem Incremental de Chapas: a - Estampagem com Ponto Simples, b - Estampagem NC sem Matriz (HIRT et al., 2003).

A Fig. 2.12 facilita a exemplificação do processo que foi estudado neste relatório, onde a chapa é fixada em um suporte na mesa da fresadora. A ferramenta de estampagem é um cilindro com uma ponta semiesférica, e a ferramenta é acoplada na árvore da máquina. A ferramenta de estampagem aplica uma força para dentro da chapa, deformando plasticamente e causando uma micro deformação local. Durante o processo, a ferramenta descende em pequenos passos, os incrementos  $dz$ , depois de cada volta, tendendo a aproximar-se do centro da peça através dos incrementos  $dx$  (JESWIET, 2001). A espessura da chapa  $s_0$  é reduzida para  $s_1$  na superfície inclinada da peça que possui um ângulo  $\alpha$  em relação a direção horizontal.

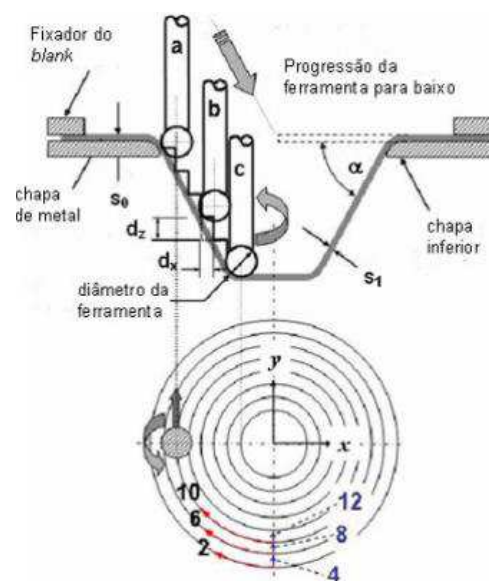


Figura 2.12 – Estampagem de ponto simples (HIRT et al., 2003).

### 2.2.2. Parâmetros importantes na Estampagem Incremental

É importante avaliar e estudar os parâmetros na Estampagem Incremental de chapas, sendo eles (JUNK et al., 2003): tamanho e forma da ferramenta de estampar, material da ferramenta, material e espessura da geratriz, planejamento da trajetória da ferramenta, passo vertical, rotação da ferramenta, força de fixação da geratriz, temperaturas envolvidas, lubrificação e outros. Esses parâmetros serão abordados no decorrer da revisão.

### 2.2.3. Passo Vertical

Na Fig. 2.13 relaciona a influência do passo vertical  $d_z$ , o ângulo de parede  $\alpha$  e o raio da ferramenta  $R_T$  sobre a rugosidade final. É constatado que a qualidade da superfície aumenta com o decréscimo do passo vertical, como também com o acréscimo do diâmetro da ferramenta e ângulo de parede ascendente (JUNK et al., 2003).

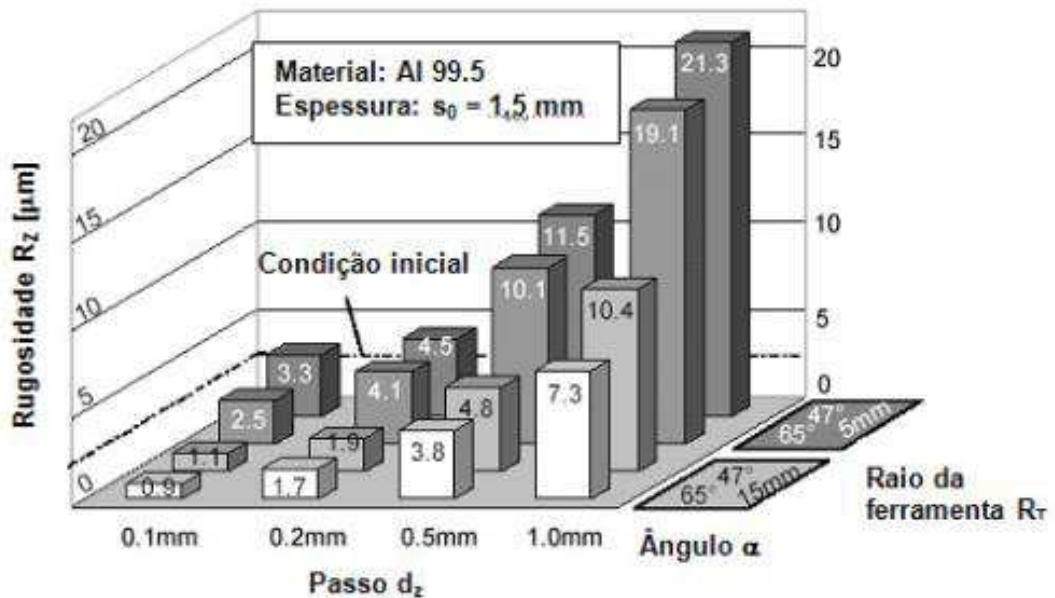


Figura 2.13 - Rugosidade  $R_z$  sob condições de estampagem padrão (JUNK et al., 2003).

#### 2.2.4. Limitações e aplicações do processo

Os processos de conformação muitas vezes são limitados por ângulos máximos que definem certas regiões da peça, impossibilitando a sua manufatura, no caso da estampagem incremental, o ângulo máximo de parede de uma chapa deve ser de  $65^\circ$ , acima desse valor é comum ocorrer a ruptura, ou em efeitos de menor escala, uma diminuição severa da espessura da chapa, levando a uma baixa resistência mecânica local (KOPAC; KAMPUS, 2005).

A variação ou constância de um volume leva a uma relação entre a espessura e o ângulo da parede, para estudar essa relação usa-se a lei do seno, para evitar a falha quando ocorre um afinamento extremo da chapa, podendo falhar quando aplicado grandes ângulos em apenas um passe (JUNK et al., 2003). A lei do seno que determina o ângulo máximo de estampagem é definida pela Eq. (2.22):

$$t_1 = t_0 * \text{sen} (90-\alpha) \quad (2.22)$$

Sendo  $t_0$  é a espessura original da chapa,  $t_1$  a espessura da chapa medida em um determinado estágio do processo de conformação e  $\alpha$  a o ângulo de inclinação da chapa neste mesmo ponto, conforme a Fig. 2.14.

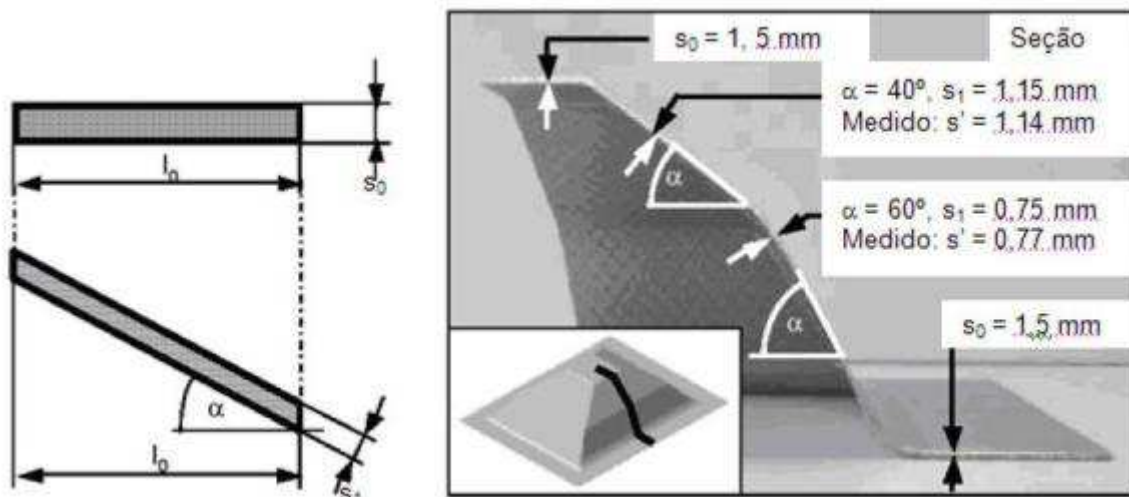


Figura 2.14 - Redução da espessura de parede. (JUNK et al., 2003).

Uma característica que ocorre nos processos de estampagem de modo geral, e que também acontece na ISF e que dita os limites de qualidade geométrica é o retorno elástico. Além da deformação plástica programada, a deformação elástica produz discrepâncias

geométricas entre o produto final e seu modelo correspondente em CAD (DUFLOU et al., 2005).

As aplicações industriais da estampagem incremental são destinadas a lotes pequenos de peças, com mudanças constantes em sua geometria, possibilitando flexibilidade e economia, se comparado às matrizes tradicionais de estampagem (KOPAC; KAMPUS, 2005). Segue algumas aplicações:

- Indústria automobilística: chaparias de automóveis na Fig. 2.15 (interiores e exteriores): A vantagem neste caso seria a grande flexibilidade de alterações do design e o baixo custo, já que não seria necessária a produção de novos moldes;

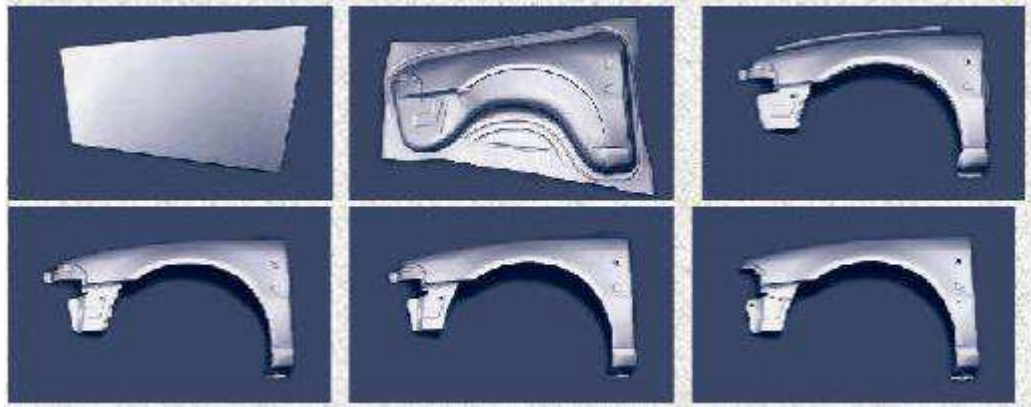


Figura 2.15 - Aplicações recentes da ISF (KOPAC; KAMPUS, 2005).

- Indústria médica: fabricação de próteses metálicas para substituir partes de ossos perdidas em acidentes. Na Fig. 2.16 é ilustrado um caso real de reconstrução do crânio de uma vítima de acidente automobilístico;

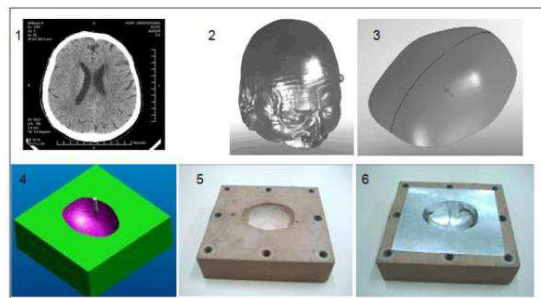


Figura 2.16 - Etapas de estampagem de prótese craniana (CASTELAN, 2010).

- Indústria moveleira: móveis de aço com formas arredondadas, de difícil produção comercial, devido ao custo;
- Utensílios domésticos de pequeno porte: objetos metálicos de espessura fina e formas geométricas complexas;
- Peças decorativas: a fabricação de peças exclusivas e com apelo artístico, como a reprodução e/ou restauração de antiguidades também se constitui como uma importante aplicação comercial.

### 2.3. Aço Inoxidável AISI 430

O material ótimo para Estampagem Incremental é aquele que consegue fornecer uma reduzida tensão de escoamento e uma grande tensão máxima, equilibrado a uma grande deformação relativa  $\epsilon$ . Em busca desse material existem alguns que estão sendo testados, como é o caso das chapas de baixo carbono, de aço inoxidável, de alumínio, de titânio e de aços revestidos. Sendo importante avaliar a geometria final e o efeito mola (LAMMINEN et al., 2005).

O aço inoxidável possui forte efeito mola e o produto final pode retorcer durante a estampagem, devido também as elevadas forças de estampagem, sendo necessário lubrificação e baixa velocidade de estampagem. Já o alumínio depende da liga usada, porém, puro é facilmente estampado. O titânio aquece durante a estampagem e tende a enrugar.

Os aços inoxidáveis ferríticos são de longe os tipos mais utilizados para fabricação de equipamentos e utensílios domésticos, pois não possuem níquel em sua composição, o que reduz significativamente o custo de produção. O cromo é o principal constituinte da liga ferrítica, juntamente com pequenas adições de outros estabilizadores, tais como silício e nióbio. Os aços inoxidáveis ferríticos contêm, em geral, uma quantidade de cromo superior a dos martensíticos. Isso melhora a resistência à corrosão, mas em parte sacrifica outras propriedades, como a resistência ao impacto.

O mais popular dos aços ferríticos é o 430. Com cromo superior a 16%, é um material com ótima resistência à corrosão. Sua capacidade de estampagem também é boa, mas estampagens muito profundas não podem ser conseguidas com esse tipo de aço. A maior

limitação para a utilização do aço 430 é a soldabilidade do mesmo. As soldas nesse aço são frágeis e de menor resistência à corrosão.

A formação parcial da martensita (mesmo com o baixo conteúdo de carbono), a precipitação de carbonitreto de cromo e o crescimento excessivo do tamanho do grão nas regiões soldadas são as principais causas que acarretam o mal desempenho deste material na soldagem. As aplicações do 430 se restringem àquelas que não precisam de soldagem, ou quando as soldas não são consideradas operações de alta responsabilidade. Por exemplo, uma pia de cozinha pode ser soldada com a mesa, mas não se pode construir um tanque para estocar ácido nítrico (mesmo que o 430 resista muito bem a este ácido). Uma solução para este problema de soldabilidade seria fazer o recozimento depois de soldar. Porém, isto aumenta os custos e, muitas vezes, pelas características da estrutura soldada, um recozimento não é possível. Outra alternativa (que é utilizada na prática) é a de adicionar, como elementos de liga, estabilizadores como o titânio e o nióbio. Os elementos estabilizadores têm uma grande afinidade química com o carbono, formando então carbonetos destes elementos. Ataca-se desta maneira, principalmente, a formação de martensita (fase rica em carbono) e a precipitação de carbonitreto de cromo. O crescimento de grão das regiões soldadas é também, em parte, limitado pela presença de elementos estabilizadores.

O 430 é mais utilizado devido a sua infinidade de aplicações. É muito empregado na produção de equipamentos para fabricação de ácido nítrico, adornos de automóveis, utensílios domésticos em geral, como baixelas, fogões, geladeiras, pias, talheres. Cunhagem de moedas e fichas telefônicas, revestimento de elevadores e balcões frigoríficos. (PORTAL METÁLICA, 2016).

#### **2.4. Ferramenta para Estampagem Incremental**

A definição da melhor ferramenta (material, formato e tamanho) depende das características geométricas do material e da espessura da peça. Diferente das ferramentas de usinagem convencionais, as ferramentas de estampagem incremental não possuem arestas de corte e por isto necessitam de um corpo maleável, para suportar a pressão de conformação. A ponta de contato com a peça necessita de uma dureza alta para suportar o atrito com a chapa a ser

conformada. Sugere-se que o corpo da ferramenta seja em Aço ABNT 1080, cujas características principais são a sua alta dureza e tenacidade, e a ponta seja em Aço ABNT H13, por sua alta resistência a trincas por fadiga térmica, resistência ao desgaste e maior estabilidade dimensional durante o tratamento térmico de beneficiamento.

A ferramenta desliza sobre uma superfície de chapa estampada e causa estiramento e dobramento da chapa. Normalmente o diâmetro mínimo empregado na ferramenta é 6 mm. O diâmetro afeta a qualidade da superfície e grandes diâmetros resultam em superfícies mais lisas bem como as marcas das ferramentas são menores. A força de estampagem depende da espessura da chapa e material. A força tem que exceder a tensão de escoamento para criar uma deformação plástica (LAMMINEN et al., 2005).

A ferramenta desliza sobre uma superfície de chapa estampada e causa estiramento e dobramento da chapa. Normalmente o diâmetro mínimo empregado na ferramenta é 6 mm. O diâmetro afeta a qualidade da superfície e grandes diâmetros resultam em superfícies mais lisas bem como as marcas das ferramentas são menores. A força de estampagem depende da espessura da chapa e material. A força tem que exceder a tensão de escoamento para criar uma deformação plástica (LAMMINEN et al., 2005).

Os revestimentos possibilitam as ferramentas de estampagem com uma fina camada superficial, elevada dureza, mantendo ao mesmo tempo um núcleo com dureza relativamente baixa e boa tenacidade. A superfície de contato da ferramenta possui alta resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito, alta resistência a esforços de compressão e alta resistência à fadiga. Além do aumento da vida útil das ferramentas, revestimentos PVD propiciam um melhor acabamento dos produtos conformados (VENCOVSKY et al., 2010).

Os revestimentos mais empregados em ferramentas de conformação são: TiN, (Nitreto de Titânio), CrN (Nitreto de Cromo) e TiCN (Carbonitreto de titânio).

A ferramenta de conformação precisa ter uma ponta esférica, pois a área que fica em contato com a peça tangencia a parte mais externa da esfera. Como mostra a Fig. 2.17:

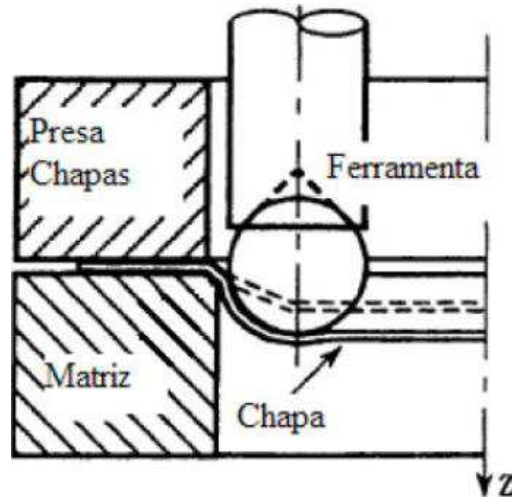


Figura 2.17 - Ferramenta de ponta esférica (ISEKI; NAGANAWA, 2002).

## 2.5. Configuração do suporte prensa-chapa

O projeto do dispositivo foi idealizado por SILVA FILHO et al. (2005), com ajuste e fixação da chapa feita de forma manual, por meio de parafusos, conforme pode ser observado na Fig 2.18.

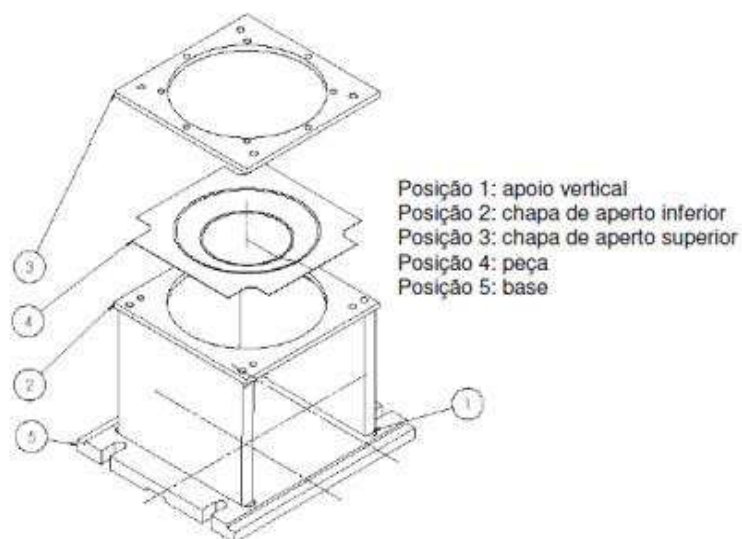


Figura 2.18 - Conceito inicial do dispositivo prensa-chapas (SILVA FILHO, 2005).



A desvantagem desse dispositivo é o tempo necessário para a troca das chapas, pois o aperto se dá por meio de parafusos M12 (CAVALER, 2010).

## 2.6. Lubrificação

O processo de estampagem requer lubrificação na superfície da chapa. A lubrificação diminui a fricção entre a ferramenta e a chapa e absorve o calor causado pela deformação. A quantidade do lubrificante depende do material e da espessura da chapa. A lubrificação diminui o trabalho para estampagem, e o potencial para a superfície tornar-se danificada pela fricção (HAGAN, et al., 2003). (Reagan et al., 1991), discutem diferentes maneiras para a lubrificação, o qual dependem do tipo de material e a temperatura do ambiente. Os três lubrificantes tradicionais são: sebo, utilizado na fabricação de velas, sebo misturado com óleo e sabão misturado com óleo (HAGAN, et al., 2003). O sebo de velas é aplicado diretamente no material, enquanto as outras duas misturas devem ser preparadas antes, de forma manual. Um bom lubrificante permanece na superfície do blank e é aplicado frequentemente em pequenas quantidades.

Algumas substâncias sólidas apresentam características peculiares que permitem a sua utilização como lubrificantes, em condições especiais de serviço. Entre as características importantes dessas substâncias, merecem ser mencionadas as seguintes:

- Baixa resistência ao cisalhamento;
- Estabilidade a temperaturas elevadas;
- Elevado limite de elasticidade;
- Alto índice de transmissão de calor;
- Alto índice de adesividade;
- Ausência de impurezas abrasivas.

Embora tais características não sejam sempre atendidas por todas as substâncias sólidas utilizadas como lubrificantes, elas aparecem de maneira satisfatória nos carbonos cristalinos, como o grafite, e no bissulfeto de molibdênio, que são, por isso mesmo, aquelas mais comumente usadas para tal finalidade.

O grafite, após tratamentos especiais, dá origem ao grafite coloidal, que pode ser utilizada na forma de pó finamente dividido ou em dispersões com água, óleos minerais e animais e alguns tipos de solventes.

A utilização de sólidos como lubrificantes é recomendada para serviços em condições especiais, sobretudo aquelas em que as partes a lubrificar estão submetidas a pressões ou temperaturas elevadas ou se encontram sob a ação de cargas intermitentes ou em meios agressivos. Os meios agressivos são comuns nas refinarias de petróleo, nas indústrias químicas e petroquímicas.

A vaselina ou gelatina de petróleo é uma parafina líquida: é oleaginosa, límpida, incolor, não fluorescente, inodoro quando frio, mas apresenta leve odor de petróleo quando aquecido, insípido. Insolúvel na água e no álcool, miscível com a exceção do óleo de rícino, solúvel no éter, clorofórmio, éter de petróleo e nos óleos essenciais.

Por ser uma mistura, apresenta ponto de fusão não definido, observando-se um amolecimento perto dos 36 °C e completando-se a passagem ao estado líquido acima dos 60 °C. O ponto de ebulição é acima dos 350 °C. A vaselina é hidrófoba, ou seja, praticamente não se dissolve em água, e é menos densa que está (0,9 g/cm<sup>3</sup>). É usada como base em muitos produtos cosméticos. Foi desenvolvida para lubrificação de equipamentos em geral, proteção contra oxidação, inclusive em ambientes agressivos, como a maresia. Elaborado a base de vaselina e óleos minerais. Forma uma película protetora. Protege componentes elétricos contra formação de zinabre. Não ataca a borracha e mantém uma ótima aparência no local da aplicação. Utilizado na montagem de vidros automotivos, cabos, trilhos, portas, bicicletas, motocicletas, barcos, ferramentas, eletrodomésticos, utensílios de pesca e máquinas e equipamentos em geral, facilita a fixação com a borracha.

O óleo multiviscoso SAE 10w30 semissintético com viscosidade de 4,1 mm<sup>2</sup>/s em temperaturas frias e de 9,3 a 12,5 mm<sup>2</sup>/s à 100°C e densidade 0,882 g/cm<sup>3</sup>. A escolha deste óleo e não de fluidos de corte, usualmente utilizados em processos de usinagem, se deve ao fato de que os ensaios de estampagem não geram cavacos e, portanto, não há necessidade de remoção do material, o que é uma das funções do fluido de corte. Além do mais os óleos automotivos comerciais são dotados de aditivos de extrema pressão (EP), condição presente durante a estampagem incremental.

Aditivos de extrema pressão, citados na literatura inglesa como EP additives (de extreme pressure additives), são aditivos para lubrificantes cujo papel é diminuir o desgaste das peças

das engrenagens e outros componentes expostos a pressões muito elevadas. Eles são adicionados também a fluidos de corte de metais em usinagem.

O mecanismo de ação dos aditivos EP é similar à dos aditivos anti-desgaste, com uma substância aditiva formando um revestimento na superfície das peças. Esta camada protege a superfície a partir de um ponto de contato direto com outro, diminuindo o desgaste. Os aditivos EP são usados na maioria de aplicações com engrenagens de baixa velocidade de operação e altamente carregadas, quando existe uma condição de lubrificação que na ausência seria responsável pela maioria das falhas devido a desgaste adesivo, sendo tal condição conhecida como uma condição de contorno (fronteira). Numa condição de contorno não existe separação das superfícies que interagem. A função de um aditivo EP é evitar este desgaste adesivo e proteger os componentes quando a viscosidade do óleo lubrificante não pode proporcionar a espessura da película necessária.

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta todos os equipamentos, a ferramenta e os materiais, tratando a metodologia de trabalho utilizada nos testes de estampagem incremental do aço AISI 430. Até chegar na etapa final, onde a chapa está na forma desejada, vários processos foram utilizados:

- Corte da chapa inicial para adequar as dimensões usando a tesoura elétrica;
- Corte da chapa pelo processo de jato de água, para os testes de tração;
- Caracterização em um modelo CAD/CAM para geometria inserida na peça;
- Análise do código G gerado através dessa geometria;
- Configurar a comunicação entre o computador utilizado e a máquina CNC;
- Fixação da ferramenta no eixo da CNC;
- Fixação da chapa de teste no dispositivo prensa chapas;
- Aplicação do lubrificante sobre a chapa;
- Verificação dos parâmetros de segurança para operar teste na CNC;
- Realização dos testes.

### 3.1. Chapas

Os corpos de prova utilizados nos testes possuem dimensões de 240 mm de comprimento por 240 mm de largura, e foram retirados de uma chapa de aço inoxidável AISI 430 com espessura de 0,5 mm, através do corte com tesoura elétrica, ilustrado na Fig 3.1.

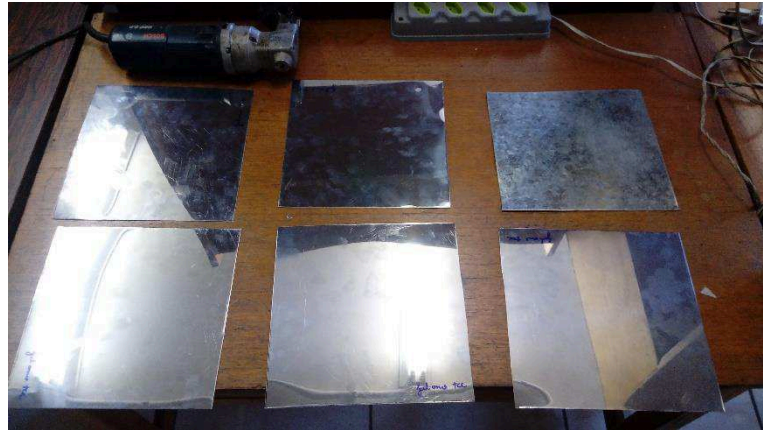


Figura 3.1 – Chapas de aço AISI 430 utilizadas nos testes

### 3.2. Características da ferramenta

Foi utilizado uma ferramenta de aço AISI 52100 de aço-ferramenta, com comprimento de aproximadamente 85 mm e possuem uma ponta semiesférica com diâmetro de 12 mm, conforme Fig 3.2.



Figura 3.2 - Ferramenta de ponta esférica de aço.

### 3.3. Centro de usinagem

A máquina utilizada para os testes práticos será um Centro de Usinagem Romi Discovery 760 (Figura 39) com as seguintes características físicas: dimensões da mesa - 840 x 360 mm, curso eixo x - 590 mm, curso eixo y - 406 mm, curso eixo z - 508 mm. O peso máximo que pode ser colocado sobre a mesa é de 350 kg, conforme Fig. 3.3.



Figura 3.3 - Centro de Usinagem Romi Discovery 760 – UFU

### 3.4. Configuração do suporte prensa-chapa

O suporte utilizado nos ensaios foi construído pelos alunos do Laboratório de Pesquisa e Usinagem (LEPU), no qual mostrou bastante rigidez e excelente fixação, contando com 16 furos em concordância com os furos de quatro peças metálicas, que são fixadas em cima do suporte, e entre o vão do suporte e das quatro peças, a chapa metálica é fixada com o aperto de 16 parafusos, Fig. 3.4:



Figura 3.4 – Suporte para fixação de chapas para realizar testes de estampagem incremental

### 3.5. Geometria da peça

A geometria da peça foi gerada em um software de CAD/CAM, sendo um tronco de cone com inclinação de  $45^\circ$  e profundidade de 60 mm, no qual a ferramenta faz a trajetória helicoidal cônica, sempre em contato com a chapa estampada, Fig 3.5:

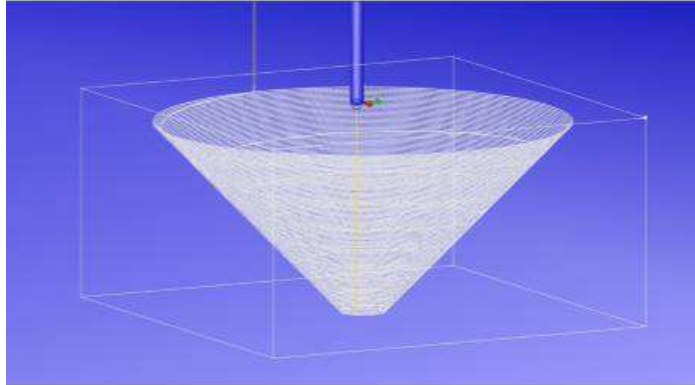


Figura 3.5 – Geometria gerado em software CAD/CAM

### 3.6. Lubrificação

Os lubrificando estudados nesse trabalho são: graxa grafitada Lubrax Calcium, Orbi vaselina orbi spray 5315, óleo Lubrax Sae 10w30, e o teste a seco. O teste a seco foi realizado para verificar a influência dos lubrificantes, em relação a influência térmica e as forças atuantes, devido ao grande aumento da componente de atrito, ilustrado na Fig. 3.6.

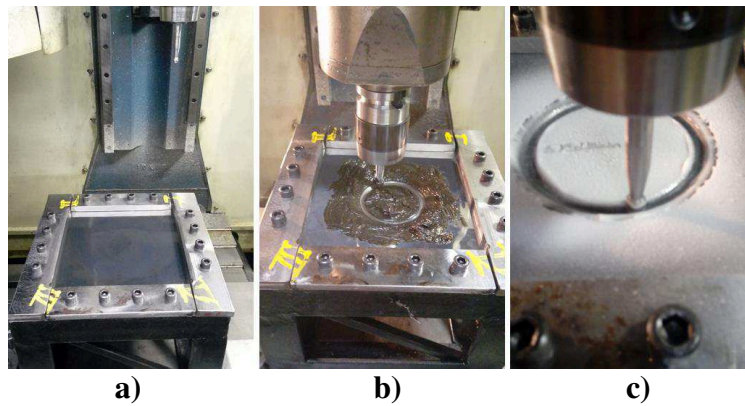


Figura 3.6 – a) Teste sem lubrificante, b) Teste com graxa grafitada, c) Teste com vaselina.

Os lubrificando estudados nesse trabalho são: graxa grafitada Lubrax Calcium, Orbi vaselina orbi spray 5315, óleo Lubrax Sae 10w30, e o teste a seco.

O teste a seco foi realizado para verificar a influência dos lubrificantes, em relação a influência térmica e as forças atuantes, devido ao grande aumento da componente de atrito.

### **3.7. Chapas para teste de rugosidade**

Para obtenção das amostras para os testes de rugosidade as chapas estampadas foram cortadas na serra elétrica, na região logo após o início do raio maior, ou seja, primeira volta da estampagem, para analisar o efeito de cada lubrificante ensaiado na superfície, conforme Fig. 3.7.



Figura 3.7 – Peça encaixada para realizar corte de amostra em serra elétrica.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. Resultado dos ensaios de Estampagem Incremental**

As figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 são os resultados dos testes para as situações:

- Usando graxa grafitada Lubrax Calcium como lubrificante, a geometria foi conformada na chapa com sucesso, apresentando melhor rugosidade nos parâmetros analisados, como esperado, devido sua melhor capacidade de diminuir as forças de atrito em relação aos outros lubrificantes testados.



Figura 4.1 – Resultado do ensaio de estampagem incremental com graxa grafitada Lubrax Calcium.

- Com o uso óleo Lubrax SAE 10w30 os parâmetros de rugosidade medidos foram inferiores em relação a graxa. Ocorreu o aumento de sua temperatura durante o teste, devido ao confinamento gerado pela superfície em forma de tronco de cone, com a transferência de calor da peça para lubrificante, gerado principalmente pela força de atrito entre a fermenta e a peça.



Figura 4.2 – Resultado do ensaio de estampagem incremental com óleo Lubrax SAE 10w30.



- Realizando o teste a seco foi notório o ruído gerado pelo atrito direto da ferramenta com a peça, com volume elevado, indicando que a força de atrito também estaria alta para o teste. Após aproximadamente 8 minutos de teste a começou a ruptura da peça, que se estendeu a cada volta completada do processo incremental, na direção de preferência de plano de escoamento, conforme calculado no índice de anisotropia.



Figura 4.3 – Resultado do ensaio de estampagem incremental sem lubrificante em chapa de aço Inox 430.

- Usando vaselina em spray como lubrificante foi teste que apresentou o tronco com as dimensões mais próximas do modelo, porém foi o que ocasionou maior atrito, e ruído, entre os testes com lubrificantes, ocasionando o pior acabamento entre eles.



Figura 4.4 – Resultado do ensaio de estampagem incremental com vaselina em spray.

## 4.2. Ensaio de tração

Os dados obtidos com os testes tração na chapa de aço Inox 430 foram tensão (N/mm<sup>2</sup>) e deslocamento (mm). Através do deslocamento e das medidas iniciais, pode-se calcular a deformação relativa ( $\epsilon$ ):

- Para 0° a tensão máxima foi de aproximadamente 397,56 MPa, conforme Fig. 4.5.

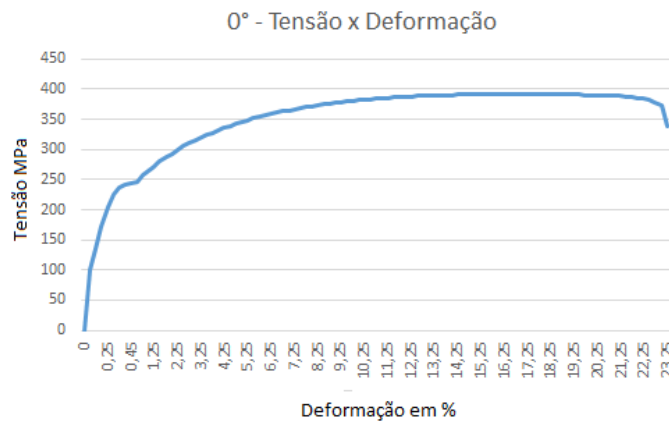


Figura 4.5 – Curva tensão x deformação para ângulo de laminação de 0°.

- Para 45° a tensão máxima foi de aproximadamente 412,33 MPa, conforme Fig. 4.6.

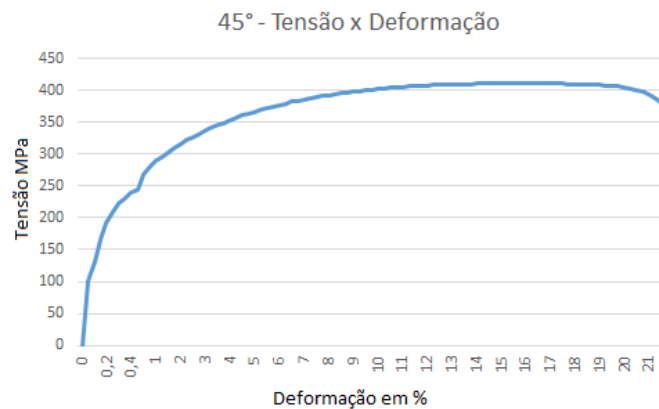


Figura 4.6 – Curva tensão x deformação para ângulo de laminação de 45°.

- Para 90° a tensão máxima foi de aproximadamente 407,68 MPa, conforme a Fig. 4.7.

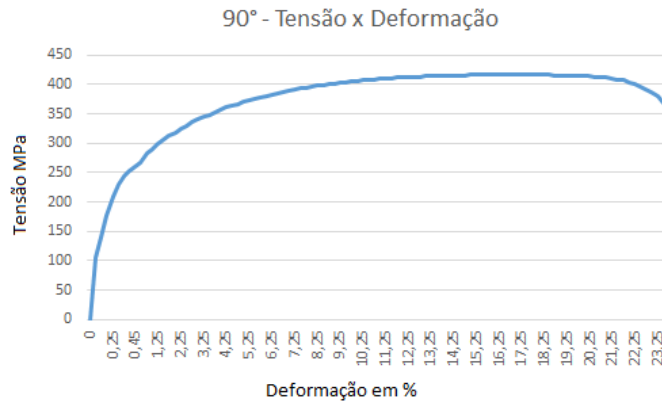


Figura 4.7 – Curva tensão x deformação para ângulo de laminação de 90°.

### 4.3. Testes de rugosidade

Os testes de rugosidade foram realizados em um rugosímetro digital com cut -off de 0,8 um e comprimento de medição de 4mm. Analisando os três parâmetros: Ra, Rq e Rt.

Os valores de Rq são maiores do que Ra, por este ser mais sensível à um valor elevado de um pico ou vale, ou seja, o parâmetro Rq acentuam os valores que se afastam da média, conforme a Fig. 4.10.

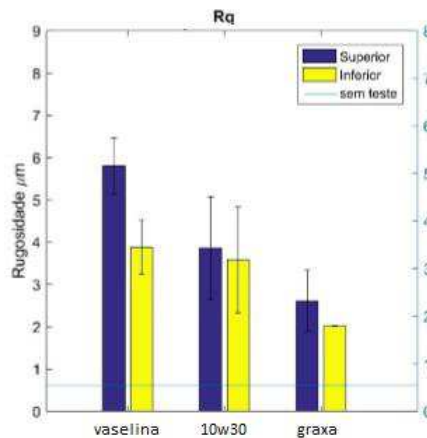


Figura 4.10 – Valores obtidos de Rq.

Os elevados valores de Rt indicam uma rugosidade elevada, pois esse parâmetro é mais sensível a mudanças no acabamento, já que considera os máximos dos picos e vales, ilustrado na Fig. 4.11.

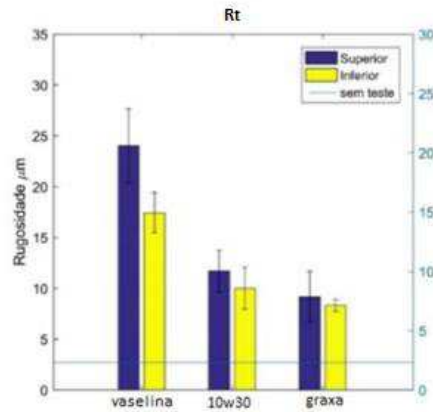


Figura 4.11 – Valores obtidos de Rt.

No parâmetro Ra confirma o que os outros parâmetros mostram, a vaselina apresentou o pior resultado, seguido do óleo 10w30, e a graxa apresentando o melhor acabamento, conforme apresentado na Fig. 4.12.

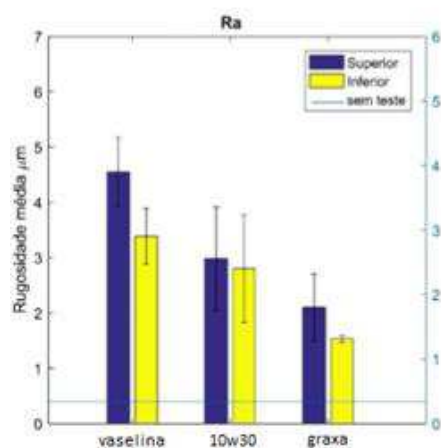


Figura 4.12 – Valores obtidos de Ra.

Quando a velocidade de avanço supera a capacidade de transmissão de dados do código G do computador para a CNC, gerava avanços indesejados na máquina com descontinuidade na movimentação, e como resultado há perda da interpolação por polinômio de segundo e terceiro grau (funções G02 e G03) para uma interpolação por seguimentos de retas (função G01) como consequência de uma maior velocidade do avanço do que de transmissão de dados, resultando em um acabamento de qualidade indesejável, com estrias nas paredes verticais.

Outros motivos podem influenciar no acabamento da peça como a alteração da temperatura do fluido lubri-refrigerante e a consequente alteração de suas propriedades, ou presença de particulados que são retirados da chapa durante o processo de conformação e ficam retidos no fluido.

#### 4.4. Índice de anisotropia

Para se calcular o índice de anisotropia do material, foi realizado a medição do comprimento e da largura do corpo de prova antes e depois do ensaio de tração. Foram avaliadas essas medidas para os três ensaios nas diferentes direções de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Os valores medidos são apresentados na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 – Medidas lineares dos corpos de prova antes e após o ensaio de tração.

Direção de laminação	Paralela ( $0^\circ$ )	Diagonal ( $45^\circ$ )	Perpendicular ( $90^\circ$ )
Comprimento inicial (mm)	87	87	87
Comprimento final (mm)	107,33	107,56	106,25
Largura inicial (mm)	12,14	12,26	12,24
Largura final (mm)	10,5	10,3	10,7

Através da Equação (2.17), pode-se calcular os valores do índice de anisotropia ( $r$ ) para cada ensaio nas diferentes direções de laminação. A Tab. 4.2. apresentam os valores calculados:

Tabela 4.2 – Índice de anisotropia  $r$ .

Direção de laminação	Paralela ( $0^\circ$ )	Diagonal ( $45^\circ$ )	Perpendicular ( $90^\circ$ )
Índice de anisotropia $r$	2,237	4,591	2,054

Utilizou-se as Equações (2.18) e (2.19) para o cálculo da anisotropia média ( $r_m$ ) e da anisotropia planar ( $\Delta r$ ), cujos valores são apresentados na Tab. 4.3:

Tabela 4.3 – Anisotropia média e planar.

	AÇO AISI 430
<b>Anisotropia média (rm)</b>	3,368
<b>Anisotropia planar (<math>\Delta r</math>)</b>	-2,445

Como o valor encontrado para a anisotropia média é maior do que 1, pode-se concluir que a chapa apresenta resistência a deformação plástica maior na direção da espessura da chapa, sendo deformada principalmente nas direções do comprimento e da largura (MELCONIAN, 2014).

## 5. CONCLUSÃO

Com esse trabalho foi verificado que o processo de estampagem incremental pode ser executado em um centro de usinagem CNC, com adaptações corretas para seu funcionamento, como a construção de uma base para fixação adequada das chapas, uso de ferramenta com ponta esférica, que não é encontrada facilmente no mercado pronta para essa aplicação, e o estudo de qual interface computador/CNC usar para comunicação simultânea de transmissão do código de dados da trajetória a ser realizada pela ferramenta em contato com a chapa.

O aço inoxidável AISI 430 apresentou boa conformabilidade quando usado lubrificante nos testes, mostrando ser utilizável no processo de estampagem incremental. A ausência de lubrificante foi um fator importante, o teste a seco não pode ser finalizado devido a abertura de uma trinca, que se propagou de forma unidirecional, afirmando os resultados calculados da anisotropia, uma possível resposta para esses resultados seria a falta de tratamento térmico da chapa de aço.

O ensaio com a vaselina mostrou pior acabamento em relação aos outros lubrificantes testados, com rugosidade elevada, devido sua liquefação na faixa de 40° à 60°C, mudando suas propriedades de lubrificação.

Um fator a ser explorado é a otimização do dispositivo prensa-chapas para a troca das chapas de aço, que demanda tempo considerável para troca das chapas devido sua fixação parafusada.

Em alguns momentos houve descontinuidade na velocidade de movimento do eixo que comporta ferramenta na máquina CNC, que afetou diretamente o acabamento superficial da peça, devido a transmissão de dados do código de trajetória G para a máquina.

## 6. REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

BET, L. Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor. 1999. 350f. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CASTELAN, J. 2010. Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano. Tese de Doutorado. Laboratório de Transformação Mecânica, PPGEM, UFRGS.

CAVALER, L.C. Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L. 2010. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, LdTM. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

CERRO, I. MAIDAGAN, E.; ARANA J., RIVERO, A.; RODRÍGUEZ, P. P. Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process. *Journal of Materials Processing Technology* 177 (2006) 404-408.

DIETER, G. E. Metalurgia mecânica. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 2º ed., 1981.

DUFLOU, J. R., LAUWERS, B., VERBERT, V., TUNCKOL, Y. e DE BAERDEMAEKER, H. 2005. Achievable accuracy in single point incremental forming: Case studies. Department of Mechanical Engineering – Katholieke Universiteit Leuven, Belgium. *Abr.*, p.675-678.

GHOSH, A.K. The Effect of Lateral Drawing-in on Stretch Formability, *Metals Eng. Quarterly*, Vol. 15, no. 3, pp. 53-61, 64. 1975.

GOODWIN, G.M. Formability Index, Paper MF 71-165, Society of Manufacturing Engineers, 1971.

HIBELLER, R. C. Resistência dos Materiais, 2010, p.14-17.

HIRT, G.; BAMBACH, M. e JUNK, S. Modelling of the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP), Saarland University, Germany. 2003.

HOLMBERG, S.A et al. Evaluation of Sheet Metal Formability by Tensile Tests, Department of Structural Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2003.

ISEKI, H. e NAGANAWA, T. 2002. Vertical wall surface forming of rectangular shell using multistage incremental forming with spherical and cylindrical rollers. Journal of Materials Processing Technology, 130, p. 675-679.

JESWIET, J. Incremental single point forming. Trans. of North American Manufacturing Research Institute NAMRC; vol. XXIX, May 22-25, 2001, pp 75 - 79. Gainesville/Florida, USA.

JUNK, S., HIRT, G., BAMBACH, M., CHOUVALOVA, I. e AMES J. 2003. Flexible CNC incremental sheet forming: Process evaluation and simulation. VI. Conferência Nacional de conformação de chapas, 15. Outubro, Porto Alegre/RS, Brasil, ed. Scheaffer L., Gráfica e Editora Brasul Ltda. P. 30-38.

KANNAN, S.; KISHAWY, H. A. Tribological aspects of machining aluminium metal matrix composites. Journal of Materials Processing Technology, v. 198, n. 1, p. 399-406, 2008.

KIM, Y. H.; PARK, J. J. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. Journal of Materials Processing Technology. 130-131 (2002) 42-46

KÖNIG, W. Tornear, Fresar e Furar. (Tradução: Prof. Dr.-Ing. WALTER L.) WEINGAERTNER. Aachen. 1981. 409 p.

KOPAC, J. e KAMPUS, Z. 2005. Incremental sheet metal forming on CNC-milling machinetool. Journal of Materials Processing Technology. University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia. n. 162-163. May, p. 622-628.

LAMMINEN, L. Incremental sheet forming with an industrial robot - forming limits and their effect on component design. Helsinki University of Technology. Finland. Advanced Materials Research Vols. 6-8 (2005) pp. 457-464. 2005.



LANGE, K. Forming Handbook. New York: Mcgraw Hill and SME, 1993.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.L.; HU, S.J. Mechanics of sheet metal forming. Butterworth-Heinemann, 2002.

MELCONIAN, M. V. Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finites: equação preditiva geral para o cálculo da força de retenção em freios de estampagem. São Paulo : Blucher, 2014.

MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK: Materials, Coatings and Industrial Applications, The Mechanics and Materials Science Series, Ohio, v.2, p.787-818.

PARK, J; e KIM, Y. 2003. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. Journal of Material of Processing Technology, 140, p.447-453.

PORTAL METÁLICA (Brasil). Disponível em: <<http://www.metallica.com.br/o-que-e-aco-carbono/>>. Acesso em: 06 de novembro de 2016.

RECH, J. et al. Characterization and modelling of the residual stresses induced by belt finishing on a AISI52100 hardened steel. Journal of Materials Processing Technology, v. 208, n. 1, p. 187-195, 2008.

SCHAEFFER, Lirio. Conformação de Chapas Metálicas. Porto Alegre, RS: Imprensa Livre, 2004, 167p.

SCHAEFFER, L. Conformação mecânica. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999. 267p

SILVA FILHO, OLIVEIRA. Apostila de mecânica dos sólidos, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), p. 3-14, 2005.

SILVEIRA NETTO, S.E.. Desenvolvimento do Processo de Construção de Curvas Limite de Conformação. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

VENCOVSKY, P. K.; YUHARA, D. Aplicação de revestimentos PVD em ferramentas de conformação de chapas. Disponível em:<<http://www.brasimet.com.br/artigos/conformacao.pdf>>. Acesso em: 06 de novembro de 2016.

WOODTHORPE, J.; PEARCE, R. The effect of  $r$  and  $n$  upon the forming limit diagrams of sheet steel. Sheet Metal Industries, 1969, p. 1061-1067.