



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais

PPGEM

ESTUDO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE
ALUMÍNIO PURO

Anderson Daleffe

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2008



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais

PPGEM

ESTUDO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE
ALUMÍNIO PURO

Anderson Daleffe

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2008

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Lício Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Rocha (PPGEM/UFRGS)

Prof. Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (Escola de Engenharia/UFRGS)

Prof. Dr. Eng. André Felipe Vieira da Cunha (POSMEC/UFSC)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Dedico a Andreza e Gilmar pela paciência, apoio e motivação.

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste Trabalho, o meu reconhecimento. Ao Professor Dr. Lírio Schaeffer, pelo estímulo, dedicação e atenção; ao LdTM e à Faculdade SATC pelo apoio logístico e tecnológico; ao CNPq pelo apoio ao projeto de estampagem incremental no Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM/UFRGS.

E ao colega Jovani Castelan pelo apoio técnico, pelas sugestões e observações valiosas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES.....	XIII
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
OBJETIVOS.....	XVI
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Estampagem.....	19
2.2 Processo de Estampagem.....	20
2.2.1. Processo de Embutimento.....	20
2.2.2 Processo de Estiramento.....	21
2.3 Histórico da Estampagem Incremental.....	22
2.3.1 Máquinas para Estampagem Incremental.....	22
2.3.2 Robôs Manipulando Ferramentas para Estampagem Incremental.....	23
2.3.3 Modelo de Ferramentas Usadas na Estampagem com Robôs.....	24
2.3.4 Robô.....	25
2.4 Máquina Dedicada a Estampagem Incremental.....	26
2.5 Descrição do Processo de Estampagem Incremental.....	28
2.5.1 Ferramentas de Estampagem Incremental.....	30
2.5.2 Lubrificação.....	31
2.5.2.1 Tipos de lubrificantes.....	32
2.5.3 Profundidade da Estampagem Incremental.....	32
2.5.4 Pontos Críticos.....	33
2.5.5 Características do Acabamento da Superfície Estampada.....	34
2.5.6 Parâmetros Importantes.....	35
2.5.7 Aplicações Industriais.....	35
2.5.8 Geometria de Peça Estampagem Incremental.....	38
2.5.9 Vantagens do Processo.....	39

2.6 Estampagem Incremental com Ponto Simples (SPIF)	39
2.7 Limites de Geometria	40
2.8 Limites do Material	41
2.8.1 Ensaio de Tração	43
2.9 Desenvolvimento do Dispositivo para Estampagem Incremental	45
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	46
3.1 Experimento Preliminar	46
3.1.1 Máquina Utilizada para Estampagem Incremental	46
3.1.2 Dispositivo Prensa Chapas	48
3.1.3 Ferramenta de Estampagem	48
3.1.4 Fixação do Dispositivo Prensa Chapas no Centro de Usinagem CNC	49
3.1.5 Fixação da Chapa no Dispositivo Prensa Chapas	50
3.2 Ensaio Realizados	50
3.2.1 Projeto da Peça a ser Estampada	51
3.2.2 Resultado do Ensaio Preliminar	52
3.3 Parâmetros de Estampagem Coletados	53
3.3.1 Velocidade de Estampagem	54
3.3.2 Profundidade de Estampagem no Eixo Z	54
3.3.3 Rotação da Ferramenta de Estampagem Incremental	54
3.3.4 Aquecimento da Ferramenta e da Chapa de Alumínio	54
3.3.5 Lubrificante Utilizado na Estampagem	55
3.3.6 Excentricidade da Ferramenta	55
3.3.7 Rugosidade Superficial da Chapa de Alumínio	56
4 CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE ALUMÍNIO	58
4.1 Determinação das Propriedades Mecânicas da Chapa de Alumínio	58
4.2 Definição das Características Mecânicas	58
4.3 Tensão de Escoamento	60
4.4 Ensaio Metalográfico	61
4.5 Análise Química	62
5 ANÁLISE DOS ENSAIOS	63
5.1 Testes de Estampagem	63
5.1.1 Teste de Estampagem N°1	63
5.1.2 Teste Estampagem N°2	64

5.1.3 Teste de Estampagem N°3.....	65
5.1.4 Teste de Estampagem N°4.....	66
5.1.5 Teste de Estampagem N°5.....	66
5.1.6 Teste de Estampagem N°6.....	67
5.1.7 Teste de Estampagem N°7.....	67
5.1.8 Teste de Estampagem N°8.....	68
5.1.9 Teste de Estampagem N°9.....	68
6 ANÁLIZE DE RESULTADOS E DISCURSÕES	70
6.1 Análise das Propriedades Mecânicas	71
6.2 Medição e Cálculo da Deformação Através da Visioplaticidade	72
6.3 Cálculo do Índice de Anisotropia.....	76
6.4 Análise dos Testes de Estampagem Mudando o Diâmetro das Ferramentas	77
6.5 Comparação dos Testes Através das Fotos	78
7 CONCLUSÃO	82
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	83
9 SUGESTÕES	85
10 BIBLIOGRAFIA	86
ANEXO 1: DISPOSITIVO PARA USINAGEM DE CORPO DE PROVA	92
ANEXO 2: FOTOS DAS FERRAMENTAS USADAS NOS TESTES PRÁTICOS.....	94
ANEXO 3: PROJETO DO DISPOSITIVO PRENSA CHAPAS.....	96
ANEXO 4: FERRAMENTAS MONTADAS NA MÁQUINA CNC	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estampagem combinada, embutimento 1, estiramento 2	21
Figura 2: Operação de estiramento por tração	22
Figura 3: Dispositivo de estampagem para robótica	24
Figura 4: Ferramentas de estampagem utilizadas na robótica	24
Figura 5: Robô usado na estampagem incremental	25
Figura 6: Chapa girando durante o processo	26
Figura 7: Máquina dedicada a estampagem incremental	27
Figura 8: Esquema de fixação da chapa	28
Figura 9: Estampagem de geometrias complexas	29
Figura 10: Estampagem livre, sem ponto de apoio	29
Figura 11: Ferramentas para atuação no eixo Z, com diâmetros diferentes	30
Figura 12: Exemplo de possíveis ferramentas	30
Figura 13: Ferramenta no processo de estampagem	31
Figura 14: Ferramenta utilizando como lubrificante graxa convencional	31
Figura 15: Profundidade do punção de estampagem	33
Figura 16: Ruptura da chapa durante o processo de estampagem	34
Figura 17: Aplicações médicas da ISF	36
Figura 18: Exemplo de estampagem	36
Figura 19: Exemplo de estampagem	37
Figura 20: Painel decorativo, produzido através da tecnologia ISF	37
Figura 21: Tipos de peças	38
Figura 22: Descrição do caminho da ferramenta	39
Figura 23: Estampagem incremental com ponto simples	40
Figura 24: Lei dos senos equação 2.1	41
Figura 25: Curvas tensão x deformação do alumínio	42
Figura 26: Curva tensão – deformação de engenharia	44
Figura 27: Idealização inicial do dispositivo prensa-chapas	45
Figura 28: Centro de usinagem discovery modelo 4022, romi com comando MACH9.	46
Figura 29: Dispositivo prensa chapas.	48
Figura 30: Ferramenta de estampagem incremental.	48

Figura 31: Ferramenta presa no mandril.....	49
Figura 32: Montagem do prensa chapas na máquina CNC.	49
Figura 33: Chapa sendo presa no dispositivo prensa chapas.	50
Figura 34: Projeto da peça a ser estampada.	51
Figura 35: Fotos da peça já estampada vista superior.	52
Figura 36: Fotos da peça já estampada vista inferior.....	52
Figura 37: Medição da chapa conformada.....	53
Figura 38: Coleta da temperatura durante o processo de estampagem incremental.	55
Figura 39: Aplicação de lubrificante no processo de estampagem incremental.	55
Figura 40: Medição da excentricidade da ferramenta.....	56
Figura 41: Medição da rugosidade da chapa a ser estampada.	56
Figura 42: Desenho do corpo de prova.	59
Figura 43: Corpo de prova usinado.....	59
Figura 44: Curva tensão de engenharia pela deformação	60
Figura 45: Curva de escoamento do alumínio puro (99,33% Al).....	61
Figura 46: Análise metalográfica do alumínio laminado.....	61
Figura 47: Ferramenta de estampagem incremental.	64
Figura 48: Nova ferramenta utilizada no ensaio.	64
Figura 49: Foto do teste de N°8.	71
Figura 50: Grade de círculos feita através da técnica de silk-screen (serigrafia).	72
Figura 51: Método de medição dos círculos.....	73
Figura 52: Medição realizada nos círculos.	74
Figura 53: Tipos de deformação de chapas metálicas.	74
Figura 54: Gráfico de rugosidade em função dos diâmetros das ferramentas.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados técnicos do centro de usinagem CNC Fanuc MSC-521	23
Tabela 2: Características do centro de usinagem discovery 4022.	47
Tabela 3: Características da máquina CNC.	47
Tabela 4: Análise da inclinação do ângulo de parede da peça estampada.....	70
Tabela 5: Valores de rugosidade de acordo com os diâmetros da ferramenta.....	77
Tabela 6: Fotos dos ensaios.	78

LISTA DE ABREVIATURAS

ISF	Incremental Sheet Forming
CNC	Comando Numérico Computadorizado
SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
IST	Instituto Superior Técnico de Lisboa
CLC	Curva Limite de Conformação
RPM	Rotações Por Minuto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
3D	Três dimensões
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
SPIF	Single Point Incremental Forming

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

α	[°]	Ângulo de parede de chapa na estampagem.
E	[N/mm ²]	Módulo de elasticidade.
R_0, R_{45}, R_{90}		Índice de anisotropia segundo a direção da laminação.
φ		Deformação verdadeira.
σ	[N/mm ²]	Tensão de escoamento convencional.
$\sigma_{z,y,x}$	[N/mm ²]	Tensões nas direções z , y e x .
σ_{eq}	[N/mm ²]	Tensão equivalente.
k_f	[N/mm ²]	Tensão de escoamento em função da deformação.
l	[mm]	Alongamento do corpo de prova no ensaio de tração.
Δl	[mm]	Varição do comprimento.
l_0	[mm]	Comprimento inicial do corpo de prova.
l_1	[mm]	Dimensão final do corpo de prova, na direção do estiramento.
l_2	[mm]	Dimensão final do corpo de prova, transversal ao estiramento.
a_p	[mm]	Passo vertical.
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$		Deformações principais.
F_x, F_y, F_z	[N]	Força de conformação em cada eixo ortogonal.
S_0	[mm ²]	Área inicial da seção da chapa.
S_1	[mm ²]	Área final da seção da chapa.
d_0	[mm]	Diâmetro inicial do círculo de visioelasticidade.
a	[mm]	Diâmetro final transversal do círculo de visioelasticidade.
b	[mm]	Diâmetro final longitudinal do círculo de visioelasticidade.
R_z	[μ m]	Rugosidade média.
t	[mm]	Espessura da chapa.
t_0	[mm]	Espessura inicial da chapa.
t_1	[mm]	Espessura final da chapa.
ϕ	[mm]	Diâmetro da ferramenta.
e	[%]	Deformação específica residual convencional.

RESUMO

O presente trabalho estuda o processo de estampagem incremental em chapas de alumínio puro, descrevendo as ferramentas e um suporte prensa chapas. Estuda e pesquisa bibliograficamente e experimentalmente o processo de estampagem incremental.

O trabalho apresenta os procedimentos de caracterização utilizados para determinar os limites do processo, aplicáveis para chapas de 0,5 mm de espessura em alumínio puro. A caracterização da chapa, juntamente com o ensaio mecânico de tração e os testes práticos de estampagem fornecerão um panorama da estampagem incremental, para algumas situações diversas sobre o tema. Para a execução dos testes práticos foi fabricado um dispositivo prensa chapas e um punção, matriz incremental e ferramenta de estampagem incremental, também foram feitas adaptações na máquina CNC, centro de usinagem CNC com três eixos.

Palavras-chave: Ferramenta de Estampagem Incremental, Matriz Incremental, Estampagem Incremental.

ABSTRACT

This paper studies the process of incremental sheet forming, in plates the aluminum pure, describing the tools and support a press plates. Studies and literature search and experimentally the process of stamping incremental.

The work presents the characterization of procedures used to determine the limits of the process, applicable to plates of 0.5 mm thick pure aluminum. The characterization of the plate, along with mechanical traction test and practical tests of printing provide an overview of incremental printing, for some different situations on the subject. For the practical implementation of the tests was a device manufactured press plates and a puncture, matrix and incremental tool for stamping incremental, were also made adjustments in the CNC machine, CNC machining center with three axles.

Keywords: incremental sheet forming tool, incremental die, CNC device.

OBJETIVOS

Geral:

Estudar o processo de estampagem incremental e realizar testes práticos de estampagem na chapa de alumínio puro. Projetar e usinar o dispositivo para prender a chapa de alumínio de 0.5 mm de espessura, para a realização da estampagem.

Específico:

- Produzir peças em caráter experimental;
- Obter produtos através da estampagem incremental, variando formas geométricas;
- Definir os limites de estampabilidade de chapas de alumínio puro de 0,5 mm de espessura;
- Realizar os procedimentos necessários à caracterização do material: análise química, análise metalográfica, ensaios de tração e exame de visioelasticidade para verificação do índice de anisotropia.

1 INTRODUÇÃO

A indústria metal-mecânica atual possui uma ampla diversidade de produtos, se analisarmos em nossa volta praticamente todos os produtos industrializados utilizam aço em sua composição ou em seu processo de industrialização.

A produção de produtos metálicos utilizando chapas é muito ampla e diversificada, dispondo de vários processos produtivos, dentre eles o mais utilizado atualmente é a estampagem, que é basicamente realizada através de uma matriz e um punção acionado pela força da prensa dando o formato desejado a chapa plana. Os produtos são manufaturados através de processos industriais que visam uma produção maior com custo menor, tendo essa visão, o presente trabalho estuda o processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro.

Esse processo é inovador e muito pouco aplicado industrialmente, mas a estampagem incremental pode ser aplicada industrialmente em escala de produção, na construção de tanques, carcaças de proteção de equipamentos eletromecânicos e silos de armazenamento. Há ainda outras aplicações importantes, como a indústria médica, para a confecção de próteses, indústria automobilística, indústria naval, utensílios domésticos, latas para a embalagem de alimentos e outros produtos industrializados.

A Estampagem Incremental de Chapas *ISF: Incremental Sheet forming* é uma tecnologia inovadora, que teve início no Japão, consiste na conformação de chapa sem o uso de punção e matriz convencionais, conforme os processos tradicionais de estampagem de chapa [1].

O processo consiste na estampagem de chapas de metal de forma relativamente rápida e com razoável precisão a partir de arquivos de CAD em 3D, a trajetória da ferramenta é gerada por uma tecnologia CAM e controlada por programa CNC, que vai formando aos poucos a peça, através de pequenas deformações [2,3].

Utiliza uma ferramenta semi-esférica, que pode ser aplicada para vários produtos com diferentes formatos geométricos [4]. A chapa é presa sobre um dispositivo desenvolvido para a tecnologia ISF. A máquina usada para estampagem incremental pode ser um centro de usinagem CNC adaptado, um robô também adaptado ou máquinas desenvolvidas especialmente para a ISF [5].

As tendências mundiais indicam um crescente interesse por parte das indústrias que trabalham com conformação de chapa, que buscam inovadoras tecnologias reduzindo os custos e aumentando a produção. A estampagem incremental é um conceito em estudo que pelo fato de não utilizar as ferramentas de estampagem tradicionais reduz consideravelmente os custos com ferramental [6].

O trabalho tem como objetivo principal estudar o processo de estampagem incremental de chapa de alumínio puro com 0,5 mm de espessura. Realizando ensaios de estampagem incremental no centro de usinagem CNC, usando um dispositivo prensa chapas e ferramentas para a realização dos testes práticos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde 4000 a.C. na Mesopotâmia e no Egito é que são produzidos produtos utilizando chapas, produtos estes com formas geométricas simples. Eram copos de ouro e prata que foram produzidos através do processo de embutimento manual usando martelos de pedra como ferramentas. Martelos de embutir feitos de ferro e equipados com cabos foram desenvolvidos e usados a partir de 900 a. C. O desenvolvimento do processo de laminação e a fabricação das primeiras chapas finas de aço no século XVIII possibilitaram uma produção em série de peças de chapas. A partir das primeiras prensas e ferramentas de corte e embutimento profundo no fim do século XIX, iniciou-se a fabricação em série de produtos estampados [7]. O grande crescimento industrial, principalmente da indústria automobilística, impulsionou o uso da tecnologia de estampagem de chapas. Atualmente muitas peças são fabricadas através deste processo, são exemplos:

- Autopeças;
- Eletrodomésticos;
- Talheres;
- Embalagens;
- Peças de aviões;
- Peças de navio.

Surgiram também muitas maneiras de estampar chapas, com processos diferentes e com características individuais de cada processo.

2.1 Estampagem

A estampagem em sua essência compreende todas as operações executadas em prensas, sobre chapas, incluindo operações de corte e de conformação [8]. O processo de estampagem geralmente vem depois de um corte ou cisalhamento e conformando a peça de acordo com a matriz e o punção de estampagem. Um exemplo típico deste procedimento é o embutimento de recipientes cilíndricos, obtidos a partir de discos planos previamente

recortados. Se as peças necessitarem de um acabamento muito preciso, é necessário, após o corte, uma operação posterior, onde é realizado o acabamento.

De acordo com a classificação da norma DIN 8580 os processos de estampagem pertencem a dois grupos principais [7]:

- Grupo principal dos processos de conformação;
- Grupo principal dos processos de separação.

Ao grupo principal de conformação pertencem todos os processos que alteram a forma geométrica da peça sem separar ou adicionar material, como o embutimento profundo, a dobra e o repuxamento. Ao grupo principal de separação pertencem os processos de corte como o cisalhamento e o corte fino.

2.2 Processo de Estampagem

Existem muitos processos de estampagem de chapas, todos eles com o mesmo objetivo que é deformar a chapa tornando-a um produto de aplicação industrial, com dimensões precisas e formas geométricas bem definidas. Cada processo de estampagem possui muitos parâmetros diferentes e particulares para cada processo. A seguir vamos estudar alguns destes processos.

2.2.1. Processo de Embutimento

O repuxo ou embutimento é uma operação de estampagem onde uma chapa, inicialmente plana, é transformada em um corpo oco sem que haja aparecimento de rugas e trincas. As ferramentas que permitem a obtenção da forma desejada são chamadas de estampos, constituídos por um punção, uma matriz e um sujeitador chamado de prensa-chapa e usado para evitar o aparecimento de rugas durante o processo.

Durante a operação de repuxo, o punção obriga a chapa penetrar na matriz movida pela ação de uma força denominada de força de repuxo (F_R). O material da chapa flui para dentro da matriz, configurando gradativamente as paredes laterais da peça [9].

O processo de embutimento implica simultaneamente em deformações de tração e compressão. Neste processo a pressão do prensa-chapa é regulada de maneira a permitir a alimentação constante de material para a estampagem.

A pressão ajustada deve ser suficiente para impedir o enrugamento do flange, porém, na maioria dos processos de estampagem, a chapa é submetida a uma combinação de esforços de embutimento e estiramento. Na figura 1 mostram-se as regiões com predominância de embutimento, estiramento e ambos simultaneamente [10]. No momento em que o punção desloca-se para dentro da matriz temos a operação numero 1 onde o embutimento predomina, na operação numero 2 quem predomina é o estiramento, também encontramos a combinação das duas operações 1+2 conforme figura 1.

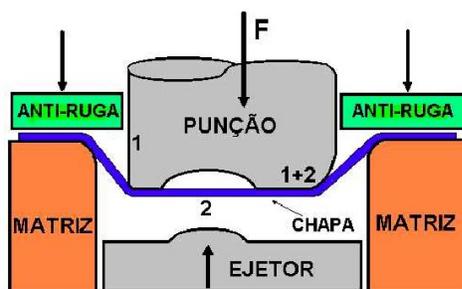


Figura 1: Estampagem combinada, embutimento 1, estiramento 2 [10].

2.2.2 Processo de Estiramento

Esta operação que consiste na aplicação de forças de tração, de modo a esticar o material sobre uma ferramenta ou bloco (matriz). Neste processo, o gradiente de tensões é pequeno, o que garante a quase total eliminação do efeito mola [11].

Como predominam tensões trativas, grandes deformações de estiramento podem ser aplicadas apenas para materiais muito dúcteis. Para estes materiais, almejam-se altos valores de coeficiente de encruamento [11].

O equipamento de estiramento consiste basicamente de um pistão hidráulico (usualmente vertical) que movimenta o punção. Duas garras prendem as extremidades da chapa e na operação não existe uma matriz fêmea. As garras podem ser móveis permitindo que a força de tração esteja sempre em linha com as bordas da chapa (figura 2). Garras fixas

devem ser usadas somente para conformação de peças com grandes raios de curvatura, evitando-se com isto o risco de ruptura da chapa na região das garras.

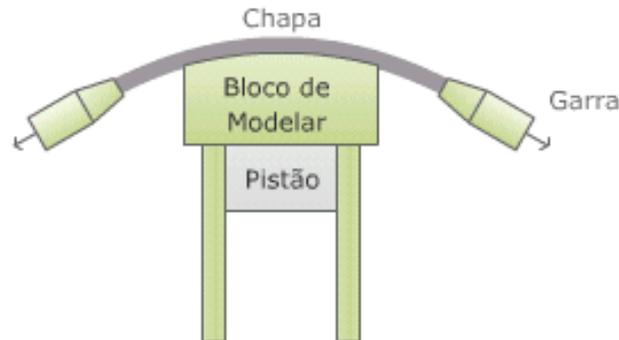


Figura 2: Operação de estiramento por tração [11].

O estiramento é uma das etapas de operações complexas de estampagem de chapas finas. Na conformação de peças como partes de automóveis ou de eletrodomésticos, é comum haver componentes de estiramento [11].

O limite de conformação no estiramento pode ser estabelecido pelo fenômeno da estricção. A estricção é a redução das dimensões da seção transversal, provocada pelas cargas de tração do processo. No estiramento deve ser evitada estricção localizada, comumente conhecida por empescoamento.

2.3 Histórico da Estampagem Incremental

A Estampagem Incremental é uma tecnologia recente que foi desenvolvida no Japão com o objetivo de atender algumas necessidades da indústria automobilística. É uma tecnologia de estampagem a frio sem o uso de matriz e com o auxílio de máquinas CNC ou Robôs. A empresa Aimonio Corporation tem comercializado esta tecnologia.

2.3.1 Máquinas para Estampagem Incremental

Segundo Kopac [12], em seus testes de estampagem, as máquinas CNC possuem um bom rendimento e estão adaptando-se perfeitamente ao processo de Estampagem Incremental. Ele utilizou para seus testes práticos um Centro de Usinagem Fancu MSC-521, 3 eixos de

posicionamento com interpolação linear e circular. Estudando a tabela 1 podemos analisar os dados técnicos da máquina.

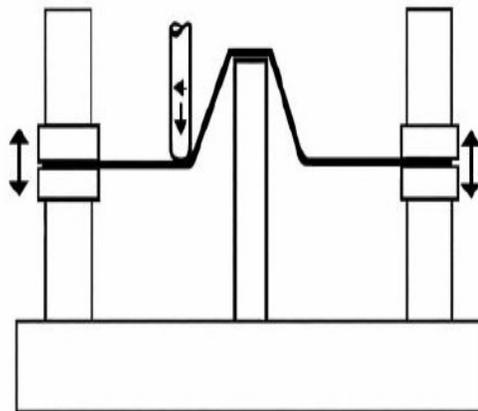
Tabela 1: Dados técnicos do centro de usinagem CNC Fanuc MSC-521 [12]

Características Técnicas	Mori Seiki (Centro de usinagem CNC Fanuc MSC – 521)
Movimento Rápido	X,Y: 20 m/min
Avanço Máximo (mm/min)	5000
Tipo/Classe de cone porta ferramenta	BT-40
Número de ferramentas no magazine	20
Resolução de Posicionamento	0.001 mm

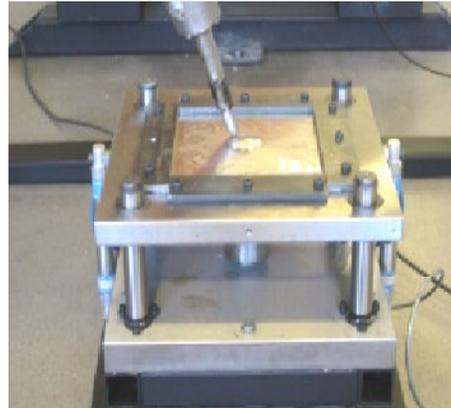
2.3.2 Robôs Manipulando Ferramentas para Estampagem Incremental

Existem estudos que mostram a aplicação de robôs na estampagem incremental. O processo é muito parecido com o empregado nas máquinas CNC, usando praticamente a mesma estratégia de conformação. O processo começa com o modelo 3D em CAD do produto, o qual é então fatiado em camadas horizontais no software CAM e transferido para a linguagem de programação do robô. O procedimento é muito similar com outros métodos de ISF, exceto que o robô é usado em vez de uma máquina CNC ou máquina especial para ISF [13].

O dispositivo de fixação ou prensa chapas usado no teste neste estudo é mostrado na figura 3. A chapa é presa ao suporte a qual se move verticalmente ao longo de quatro guias a cada canto da mesa. O movimento vertical do suporte é causado somente pela gravidade e não é controlado por nenhum dispositivo. O suporte move-se para baixo como procede a estampagem. Neste equipamento de teste a máxima dimensão de trabalho é 200 x 200 mm [13].



Projeto da Mesa de Estampagem



Mesa de Estampagem

Figura 3: Dispositivo de estampagem para robótica [13].

2.3.3 Modelo de Ferramentas Usadas na Estampagem com Robôs

A ferramenta de estampagem (figura 4) é fixada ao pulso do robô com um ângulo de 90° para obter a máxima força na ferramenta e manter os movimentos dos eixos e motores do robô na máxima faixa de trabalho deles. O teste tem sido feito usando uma ferramenta de aço hemisférica endurecida, com diâmetro de 10 mm.

*Figura 4: Ferramentas de estampagem utilizadas na robótica [13].*

2.3.4 Robô

Segundo Lamminen [13], em seu estudo, a estampagem incremental com Robôs, consiste de um robô industrial com braço (figura 5) e a capacidade de manipulação do robô é de 175 kg, o alcance de 2,55 m. A chapa é fixado ao suporte, o qual se move verticalmente ao longo de quatro guias a cada canto da mesa. O movimento vertical do suporte é causado somente pela gravidade e não controlado por nenhum dispositivo. O suporte move-se para baixo como procede a estampagem e impulsionada pelo braço do robô no decorrer do processo.

Os benefícios do robô comparados a estampagem com máquinas fresadoras ou máquinas ISF são notáveis. O robô trás flexibilidade ao processo de fabricação e possibilita a combinação de várias fases da fabricação dentro da cadeia da mesma célula de fabricação. A chapa é apanhada e posicionada, o corte com laser e os tratamentos de superfície podem ser integrados na mesma célula de fabricação operado por um único robô industrial [13].



Figura 5: Robô usado na estampagem incremental [13].

Quando se usam células de estampagem integradas, a muitas formas de realizar a estampagem incremental inclusive a possibilidade de rotacionar a chapa que esta sendo estampada durante o processo de estampagem (figura 6) [14].

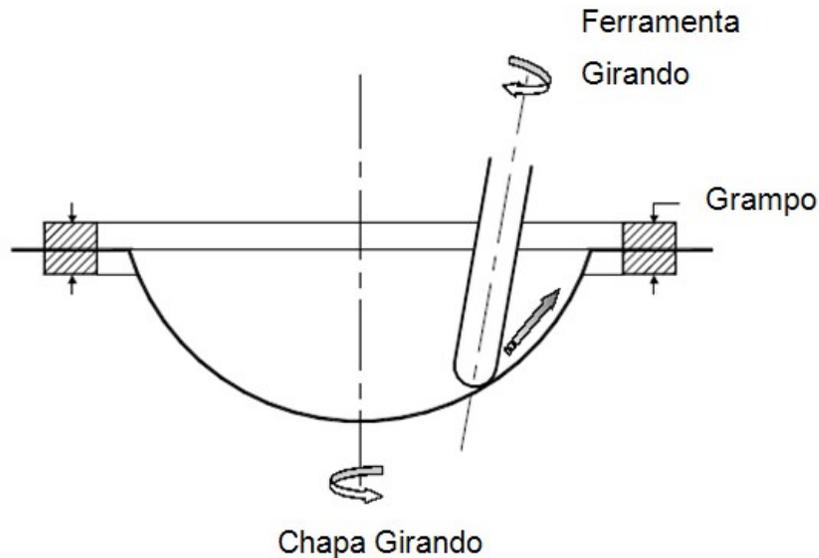


Figura 6: Chapa girando durante o processo [14]

2.4 Máquina Dedicada a Estampagem Incremental

As máquinas CNC são atrativas por causa dos baixos custos de início de operação, mas trazem algumas desvantagens: máquinas fresadoras não são geralmente projetadas para grandes carregamentos no eixo árvore, então há perigo que a máquina venha a se danificar durante as operações de estampagem incremental, máquinas CNC não são geralmente providas de instrumentação para medir as forças nos três eixos na ponta da ferramenta e, a mesa de trabalho da máquina CNC é geralmente sólida, então há um limitado acesso ao lado reverso da peça de trabalho.

Em face disto é apresenta a seguir uma máquina especializada, projetada na Universidade de Cambridge conforme figura7.

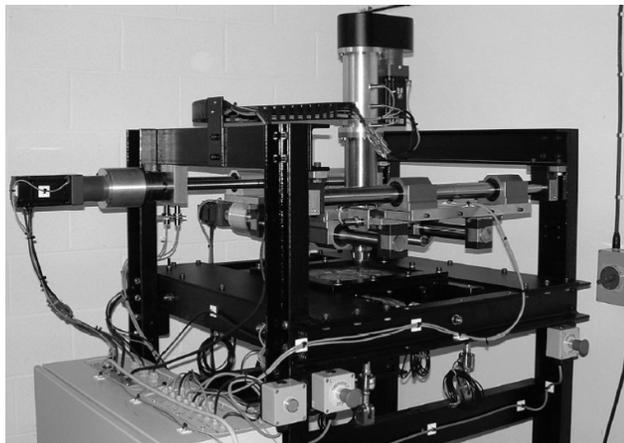


Figura 7: Máquina dedicada a estampagem incremental [13].

As dimensões planares da peça de trabalho foram escolhidas pela comparação com aproximações existentes de 300 mm x 300 mm. Trabalhos existentes na literatura [15] sugerem que os limites de estampagem do processo ocorrem para um ângulo do cone de não mais que 70° o qual, se aplicado na área inteira da peça de trabalho, requereriam movimento no eixo Z de até 400 mm. Entretanto, como altas deformações para uma máxima força horizontal prevista acima, requereriam uma poderosa árvore, o qual iria além de orçamento do projeto, então uma especificação de movimento vertical de 100 mm foi selecionada. O ângulo do cone também limita o projeto do eixo vertical para ficar dentro de um ângulo de cone escolhido a partir de um ponto de contato. Um ângulo de cone máximo de $67,5^\circ$ foi especificado para o teste inicial, mas a possibilidade de projetos de novas pontas de ferramenta quando as medidas de forças precisas foram realizadas, permitirão subseqüentes projetos de estender as ferramentas para ângulos de cone agudos [16].

Trabalhos anteriores sobre estampagem incremental de chapas usando máquinas fresadoras CNC têm permitido a exploração de várias velocidades de rotação da ferramenta. Evidências de Leach et al. [17] sugerem que a qualidade da superfície é melhor quando as velocidades de rotação da ferramenta são escolhidas para corresponder com o rolamento da ferramenta em oposição ao arraste através da peça de trabalho. Para a nova máquina, portanto foi decidido usar uma ferramenta não movimentada ou ferramenta passiva, montada em rolamentos de baixa fricção, então, não há nenhuma fricção significativa entre a peça e o lado da ferramenta que irá conduzir ao movimento relativo de rolamento.

Pesquisas em trabalhos anteriores mostram que a forma da ferramenta é um importante parâmetro em estampagem incremental, deste modo a máquina deve ser projetada para trocas relativamente simples das pontas da ferramenta.

2.5 Descrição do Processo de Estampagem Incremental

A estampagem incremental é um processo de conformação que é realizado progressivamente, mediante a ação de uma ferramenta própria para o processo. Consiste na fixação da chapa a ser conformada em um dispositivo (figura 8) que podem utiliza um ou mais pontos de apoio [18]. O material da chapa deve ter propriedades mecânicas adequadas, tais como tenacidade e ductilidade, já que é deformado plasticamente durante o processo. Ao ser conformada, a chapa original, que está fixa, tem sua espessura diminuída na região onde acontece a conformação, dando assim o formato desejado à chapa [19].

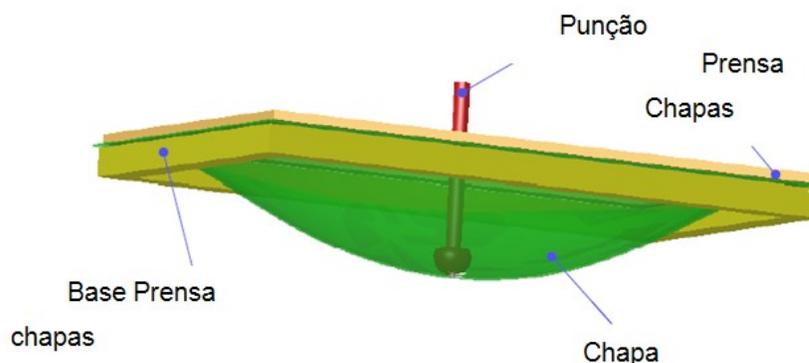


Figura 8: Esquema de fixação da chapa [19].

O equipamento utilizado pode ser comandado numericamente, através do controle de movimentos de eixos X, Y e Z. Nessa pesquisa, em particular, será utilizado um centro de usinagem vertical, o qual dá condições para realização dos testes iniciais. O dispositivo, no qual é presa a chapa, é fixado sobre a mesa do centro de usinagem CNC, onde se tem os movimentos X e Y. O movimento Z é dado por uma ferramenta fixada no eixo árvore, que atua diretamente sobre a chapa. A conformação se dá de forma incremental, já que a chapa é apoiada em um ou mais pontos [20] (dependendo da geometria), através da ação de uma ferramenta contornando este ponto de apoio em pequenos incrementos verticais, até atingir a

profundidade adequada. Os movimentos incrementais da ferramenta nos eixos X, Y e Z serão controlados por programas gerados através de tecnologia CAD/CAM [6], podemos realizar testes com geometrias complexas, como pode ser visto na figura 9.

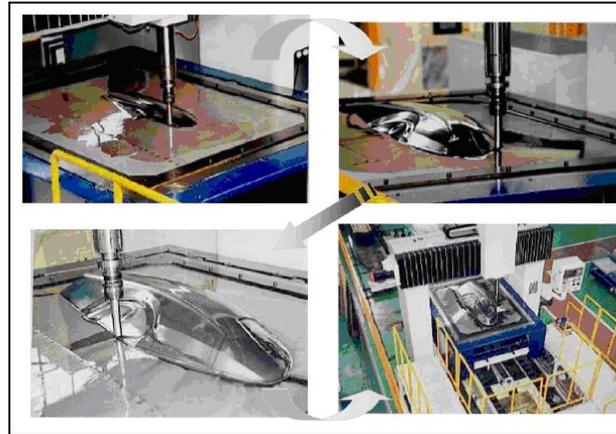


Figura 9: Estampagem de geometrias complexas [21].

A figura 10 mostra o modelo que serviu como base para o desenvolvimento do dispositivo prensa chapas, a partir dele é que se desenvolveu o croqui e as primeiras medidas de acordo com a geometria do primeiro teste que será realizado. Também foram juntadas algumas idéias no 26º SENAFOR IV Conferência Nacional de Conformação de Chapas [22].

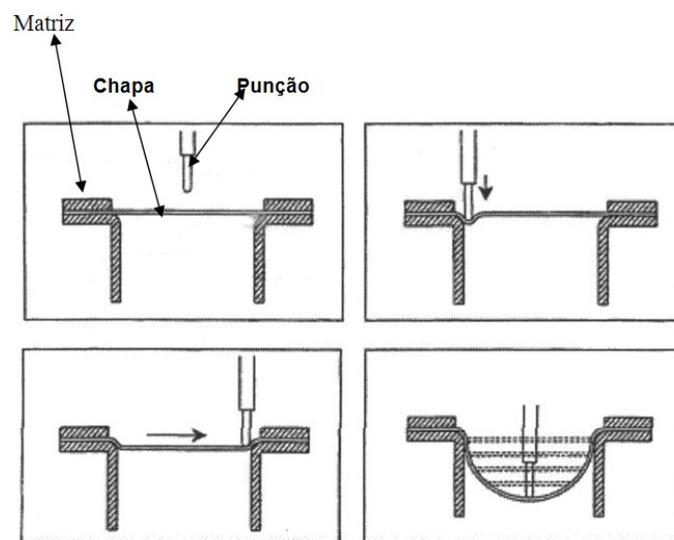


Figura 10: Estampagem livre, sem ponto de apoio [21] e [23].

2.5.1 Ferramentas de Estampagem Incremental

A ferramenta é fabricada de aço-ferramenta endurecido e a ponta da ferramenta é esférica. A ferramenta desliza sobre uma superfície de chapa a ser estampada e causa estiramento e dobramento da chapa. O diâmetro mínimo da 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 [21]. A ferramenta tem o corpo cilíndrico com a ponta esférica nas figuras 11, 12 e 13.

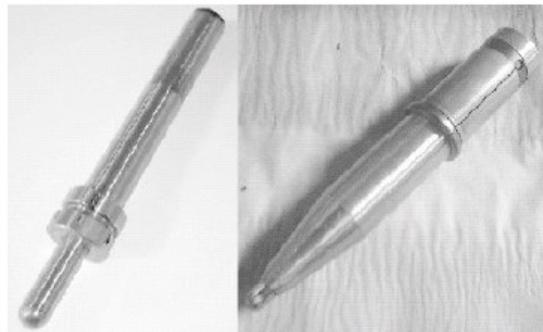


Figura 11: Ferramentas para atuação no eixo Z, com diâmetros diferentes [21].



Figura 12: Exemplo de possíveis ferramentas [21].



Figura 13: Ferramenta no processo de estampagem [24].

2.5.2 Lubrificação

A lubrificação é importante na maioria dos processos de estampagem, bem como na estampagem incremental (figura 14). Exercendo alguns papéis fundamentais como:

- Diminuir o atrito;
- Reduzir o aquecimento da peça e da ferramenta;
- Minimizar o desgaste da ferramenta de estampagem;
- Melhorar o acabamento superficial da peça;
- Estabelecer uma minimização da força de trabalho exercida pela ferramenta.

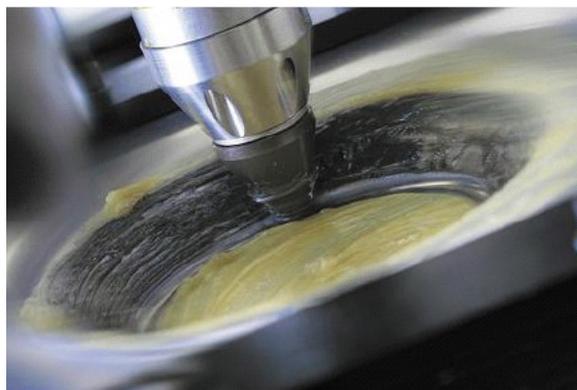


Figura 14: Ferramenta utilizando como lubrificante graxa convencional [25].

2.5.2.1 Tipos de lubrificantes

Reagan e Smith [26] discutem diferentes maneiras para a lubrificação, os quais 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. 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 da chapa e, é aplicado freqüentemente em pequenas quantidades.

Um estudo recente realizado por Ismail [27] indica que a lubrificação é fator importante porque influencia a tolerância, acabamento da superfície e forças de estampagem. Esta análise enfoca o lubrificante dentro, fora e em ambas as superfícies de formação do cone de embutimento para lubrificantes de três diferentes viscosidades. Os resultados mostraram um decréscimo na força na direção de avanço para aumentos da viscosidade do lubrificante. Segundo Fabio Tiburi [22], em seu experimento, para a redução do aquecimento e principalmente redução do atrito o lubrificante utilizado foi uma graxa para rolamentos a base de lítio.

2.5.3 Profundidade da Estampagem Incremental

Observando as circunstâncias de estampagem padrão um contato suave na superfície tem sido observado sob certas condições, por exemplo, pequeno passo vertical d_z e grandes diâmetros da ferramenta. Na figura 15 a influência do passo vertical d_z , ângulo α e o raio da ferramenta R_T sobre a rugosidade final sob condições de estampagem de simples passe padrão. Pode ser observado que a qualidade da superfície aumenta com o decréscimo do passo vertical como também com grande diâmetro da ferramenta e ângulo de parede ascendente [28].

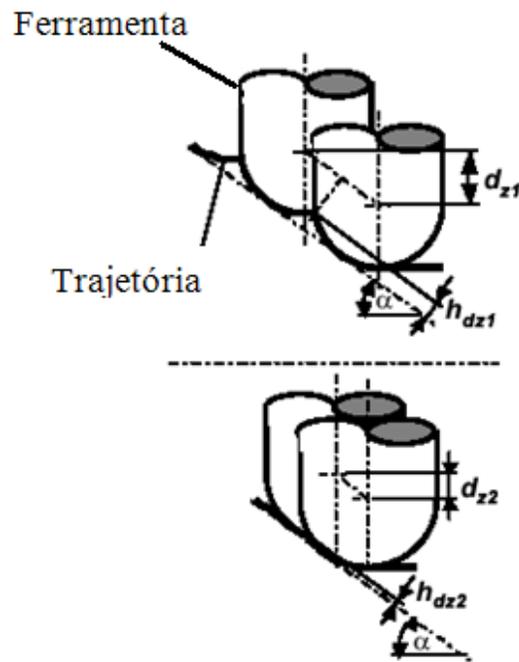


Figura 15: Profundidade do punção de estampagem [28].

2.5.4 Pontos Críticos

Toda operação de estampagem possui pontos críticos, que influencia diretamente no produto final da estampagem. Dos vários artigos pesquisados sobre estampagem incremental, nenhum fornece modelos matemáticos ou parâmetros calculáveis, sobre velocidade de estampagem, profundidades de conformação, resistência da chapa à conformação, deformações elásticas após o processo [29], cálculo e medição da força necessária para a estampagem, tanto sobre a matéria prima, forças atuantes durante o processo quanto sobre a ferramenta e os demais dispositivos. Questões práticas também devem ser consideradas, tais como: tipo de fluido utilizado na conformação, projeto, fabricação e montagem do dispositivo de fixação da chapa, atrito e conseqüentemente calor gerado pelo contato direto entre a ferramenta de conformação e a chapa, desgaste da ferramenta, cisalhamento da chapa [30] e adaptação do centro de usinagem CNC para a realização dos estudos. A ruptura da chapa figura16 é um ponto a ser analisado, ele acontece por causa do ângulo de inclinação da parede;



Figura 16: Ruptura da chapa durante o processo de estampagem [30].

2. 5.5 Características do Acabamento da Superfície Estampada

A ferramenta ao deslizar sobre a superfície a ser estampada deixa marcas em cada volta. As marcas da ferramenta podem ser diminuídas usando ferramenta com grande diâmetro e diminuindo o passo de estampagem. Passos, incrementos pequenos levam a tempos maiores de estampagem, então há um relação entre tempo de produção e a qualidade de superfície. Se o passo é menor que 0,01 mm, o material é estampado diversas vezes no mesmo lugar, o material vai encruar. Este problema ocasionará o cisalhamento da chapa. O encruamento também diminui a tensão na chapa e a forma pode ficar retorcida.

Superfícies levemente curvadas e grandes são difíceis de estampar. As marcas da ferramenta são claras, porque o movimento horizontal em cada passo torna-se tão grande, quanto uma curva muito suave. As marcas das ferramentas podem ser diminuídas usando um chapa de sacrifício no topo da chapa atual no processo de estampagem. Então a chapa de sacrifício toma as marcas da ferramenta, mas transfere a geometria para a chapa atual debaixo. A geometria não é tão precisa quanto aquela na qual a ferramenta está diretamente em contato, mas a qualidade da superfície é melhor. A chapa atual pode ser estampada novamente sem usar a chapa de sacrifício e os detalhes ficam aguçados no produto. Estes resultados freqüentemente satisfazem a qualidade [21].

Hirt, Junk e Wituski [28] têm estudado como a estampagem afeta a rugosidade da superfície. Quando o diâmetro da ferramenta aumenta, a rugosidade da superfície diminui. A rugosidade da superfície pode também ser diminuída pela troca da direção de estampagem sobre cada círculo e diminuindo o passo de estampagem. Tanto a rugosidade quanto a marca

do caminho da ferramenta depende de algumas variáveis no processo prático da estampagem, que são:

- Incremento da ferramenta no eixo Z, vertical;
- Relação direta com o diâmetro da ferramenta;
- Incremento da ferramenta nos eixos X e Y, longitudinal e transversal;
- Velocidade de deslocamento da ferramenta;
- Rotação ou não da ferramenta;
- Material da chapa a ser estampado;
- Acabamento da ferramenta.

2.5.6 Parâmetros Importantes

Os parâmetros mais importantes a serem analisados e ajustados são:

- Tamanho, forma e material da ferramenta de estampar;
- Velocidade da ferramenta;
- Espessura do material e suas propriedades mecânicas;
- A melhor estratégia da trajetória da ferramenta;
- Temperatura da chapa e da ferramenta;
- Tipo de lubrificação mais adequada para o processo e material a ser estampado;
- Força de fixação do chapa.

2.5.7 Aplicações Industriais

Pelos estudos iniciais realizados, as aplicações industriais deste processo são bastante restritas. As pesquisas apontam sua aplicabilidade comercial para chapas de geometria complexa, variável e de pequenas deformações. As aplicações mais importantes da tecnologia ISF são nos setores: aeronáutico, automotivo [31], prototipagem rápida e outros.

No setor automotivo as peças estampadas normalmente são fabricadas em pequenos lotes, tornando importante a aplicação de ISF. Em virtude disto algumas montadoras utilizam estas facilidades nos seus produtos. Como por exemplo, pode-se citar a Honda que produziu um veículo conceito, com capota e pára-lamas fabricados através ISF (Honda Fit HB7).

Atualmente algumas peças automotivas são fabricadas em materiais não metálicos (como por exemplo, poliéster), porque a fabricação de chapas metálicas não é possível, prova disto são peças fabricadas para painéis e acabamentos de carrocerias de ônibus.

Outras aplicações da tecnologia ISF são:

- Indústria de tuning, (personalização de veículos automotores) que requer alta customização de seus produtos [32];
- Indústria Moveleira: móveis de aço com formas orgânicas, de difícil produção comercial, devido ao custo;
- Utensílios domésticos de pequeno porte: objetos metálicos de espessura fina e formas geométricas complexas;
- Indústria Médica: fabricação de próteses metálicas para substituir partes de ossos perdidas em acidentes. Como é mostrado na (figura 17), onde são estampadas partes do crânio humano [33].

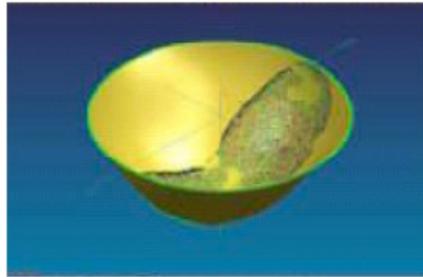


Figura 17: Aplicações médicas da ISF [33].

Segundo estudos [24], existe também aplicação da ISF para a fabricação de prótese metálica para reabilitação de membros Humanos quebrados ou trincados que necessitam ser imobilizados.

As figuras 18 e 19 mostram algumas formas geométricas utilizadas na indústria automotiva e na indústria de utensílios.



Figura 18: Exemplo de estampagem [32].



Figura 19: Exemplo de estampagem [32].

A tecnologia ISF pode ser aplicada na Fabricação de mobília, decoração e arte. Devido a em pequenos lotes. No setor biomédico, os produtos são normalmente fabricados com as necessidades específicas dos pacientes [34].

Na figura 20 mostrada a seguir, pode-se notar um painel decorativo, fabricado com aço A1050 e com espessura de 1 mm.



Figura 20: Painel decorativo, produzido através da técnica ISF [34].

2.5.8 Geometria de Peça Estampagem Incremental

A peça a ser estampada pode ter várias geometrias e com bastante complexidade conforme figura 21, pois não depende de uma matriz convencional de estampagem, que utiliza em geral duas partes, o macho e a fêmea. Tornando desta forma muito complexa a produção da matriz e utilização deste tipo de tecnologia para figuras muito complexas. Na estampagem incremental quem determina a geometria é o deslocamento da ferramenta provocado pela máquina CNC.



Figura 21: Tipos de peças [35].

Uma das limitações geométricas do processo é o diâmetro da ferramenta de estampagem. Os raios mínimos da peça dependem do raio da ponta da ferramenta, como mostra a figura 22.

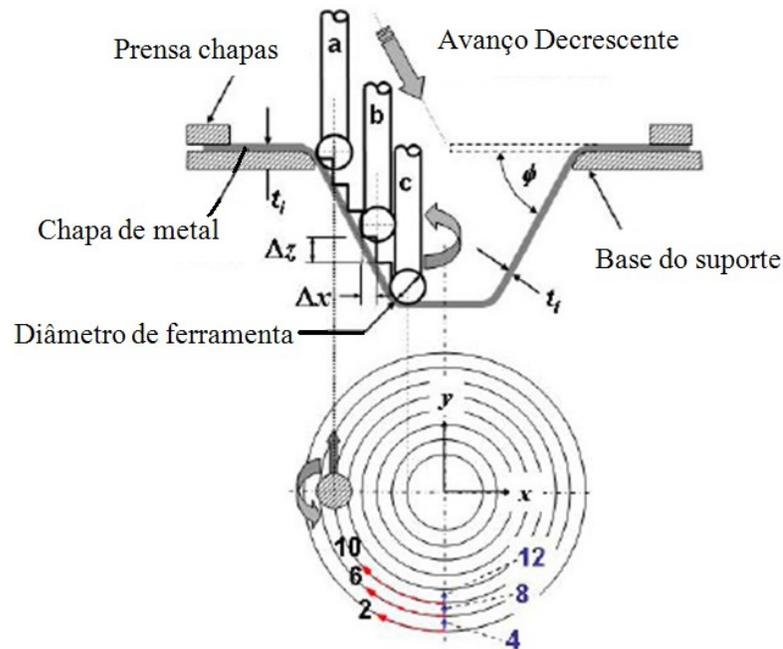


Figura 22: Descrição do caminho da ferramenta [35].

2.5.9 Vantagens do Processo

A estampagem incremental tem sua grande aplicação, segundo os artigos consultados, em produção de lotes pequenos, onde a forma dos produtos tende a variar em um curto espaço de tempo, sendo estes produtos tanto de geometrias simples como também complexas. Nessa conjuntura, constituem-se como vantagens da estampagem incremental:

- Redução de tempo de produção de peças e redução de tempo de preparação de máquina (pre-set) para produtos diferentes;
- Redução do tempo e do custo de desenvolvimento e manufatura de ferramentas;
- Linha de produção flexível sujeita as mudanças constantes.

2.6 Estampagem Incremental com Ponto Simples (SPIF)

Na estampagem incremental com ponto simples [35], a ferramenta, disposta na parte inferior do conjunto de estampagem, é eliminada e somente a ferramenta presa ao eixo árvore entra em contato com a chapa. O princípio do método é mostrado na figura 23.

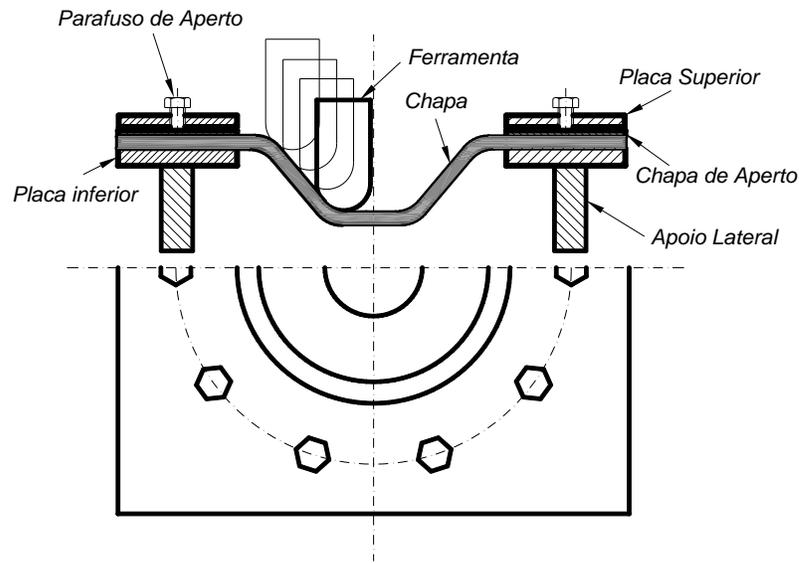


Figura 23: Estampagem incremental com ponto simples [37].

Com a estampagem incremental de ponto simples é possível obter peças com simetria axial, com ferramentas de perfil simples e dispositivo prensa-chapa fixado na mesa do centro de usinagem CNC. Esta foi a modalidade utilizada no projeto de dissertação.

2.7 Limites de Geometria

Como em outros processos de conformação (forjamento, estampagem convencional), existem valores máximos de ângulos que definem certas regiões da peça, a fim de que seja possível a sua manufatura. No caso da ISF, estudos recentes apontam para um ângulo máximo de parede de chapa de 65° [38]. Ultrapassando este valor, se torna muito freqüente a ruptura ou, no mínimo, uma diminuição drástica da espessura da chapa, causando uma baixa resistência mecânica localizada.

O ângulo máximo de estampagem é determinado por uma relação direta entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação. Isso é demonstrado pela equação 2.1, lei dos senos.

$$t_1 = t_0 * \text{sen}(90 - \alpha) \quad (\text{eq. 2.1})$$

Onde t_0 é a espessura inicial da chapa, t_1 a espessura da chapa medida em um determinado estágio do processo de conformação e α o ângulo de inclinação da chapa. Na figura 24 é mostrado o comportamento da chapa, em relação ao ângulo de inclinação da parede e sua relação com a diminuição de espessura, nos quatro exemplos mostrados a espessura inicial da chapa é 1 mm. Analisando a figura 24, exemplo 1, onde o ângulo de inclinação da chapa α é zero o t_1 manteve-se igual a t_0 então a espessura da chapa continua igual a inicial. No exemplo 2, 3 e 4 da figura 24 temos ângulo de inclinação da chapa α diferente de zero isso nos mostra que a espessura da chapa t_1 diminuindo. Quanto maior o ângulo de inclinação α menor é a espessura da chapa estampada t_1 , podendo chegar ao rompimento conforme equação 2.

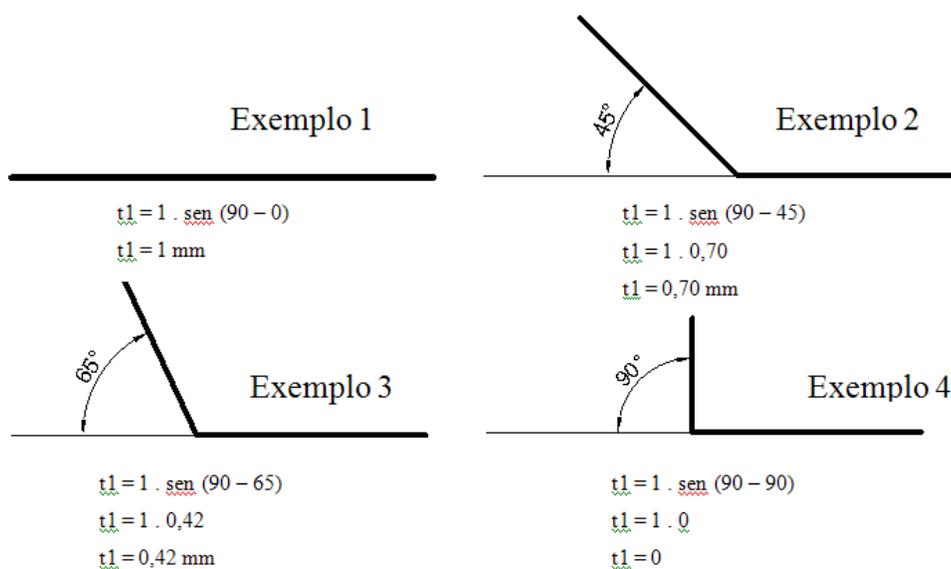


Figura 24: Lei dos senos equação 2.1 [38].

2.8 Limites do Material

O alumínio em geral possui o limite de escoamento não tão pronunciado como a maioria dos aços, o limite de escoamento do alumínio puro é de aproximadamente 12,7 MPa. A presença do patamar de escoamento permite uma fácil identificação da tensão de escoamento [39].

Esta tensão só é identificada graças a uma *deformação específica residual convencional* de 0,2% ou 2 por mil, conforme pode ser observado na figura 25 [40].

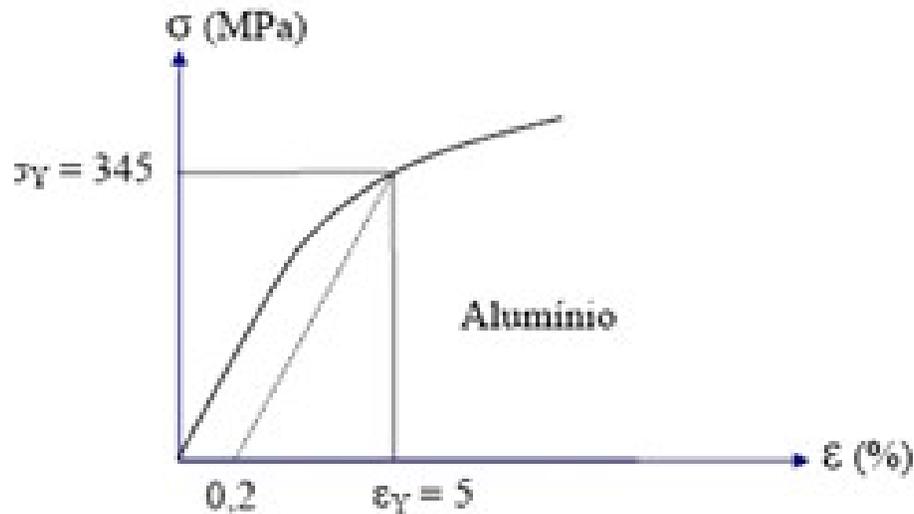


Figura 25: Curvas tensão x deformação do alumínio [41].

Apesar disto, optou-se em utilizar este material devido à outras características mecânicas que oferecem algumas vantagens [5]:

- a) Possuem módulo de elasticidade bem mais baixo que os aços. Enquanto para o alumínio puro tem-se $E = 65.000 \text{ N/mm}^2$, para um aço baixo carbono $E = 196.000 \text{ N/mm}^2$, ou seja $E_{Al} = \frac{1}{3} E_{Aço}$;
- b) Este fato faz com que a energia gasta para deformar a chapa de alumínio seja menor, diminuindo os custos de manufatura, considerando uma aplicação comercial da estampagem incremental. Além disso, essa propriedade dá ao alumínio a vantagem de dar às estruturas uma elevada capacidade de amortecer golpes e reduzir as tensões produzidas pela variação da temperatura;
- c) Possuem ótima resistência à corrosão, oferecendo durabilidade para o produto final;
- d) Possuem coeficiente de atrito igual ao dos aços em geral (0,05) e menor do que os aços inoxidáveis (0,1) [7];

e) Possuem baixo peso específico e podem ser conformadas em uma variedade de peças nas mais diferentes formas [42].

O alongamento é expresso em porcentagem relativamente ao comprimento original medido em um corpo-de-prova normal e é calculado pela diferença entre os pontos de referência, antes e depois do ensaio de tração. Esse alongamento indica a ductilidade do metal ou da liga.

2.8.1 Ensaio de Tração

Segundo Dieter [43], o teste de tração de engenharia é amplamente usado para obtenção de informações básicas sobre a resistência de materiais, e como um teste de controle de especificações. Autores como Schaeffer [44] e Souza [45] dizem ser o ensaio de tração o método mais utilizado para determinação das propriedades mecânicas de chapas metálicas. Sendo possível a obtenção do limite de resistência, do limite de escoamento, do grau de encruamento e do índice de anisotropia do material. Schaeffer [44] define o ensaio de tração como sendo um teste uniaxial e sem atrito, efetuado em máquinas de ensaios que possuem uma garra fixa e outra móvel, a fim de pegar e esticar o corpo de prova.

Ainda segundo o autor, as máquinas são equipadas com sensores para registrar a força e o alongamento do corpo de prova, os quais são confeccionados com diferentes comprimentos, larguras e formatos, definidos pelas normas ABNT NBR 6673, ASTM E 646 e DIN EN 10 002- 1.

O resultado do ensaio de tração é o diagrama tensão deformação (figura 26) que segundo Dieter [43], corresponde a uma curva de engenharia construída a partir das medidas de carga e do alongamento da amostra submetida ao ensaio. A tensão usada na curva é a tensão longitudinal média do corpo de prova obtida pela divisão da carga pela área inicial da seção do corpo de prova, e a deformação usada para a curva de engenharia é deformação linear média, obtida pela divisão do alongamento do comprimento útil do corpo de prova, pelo comprimento original.

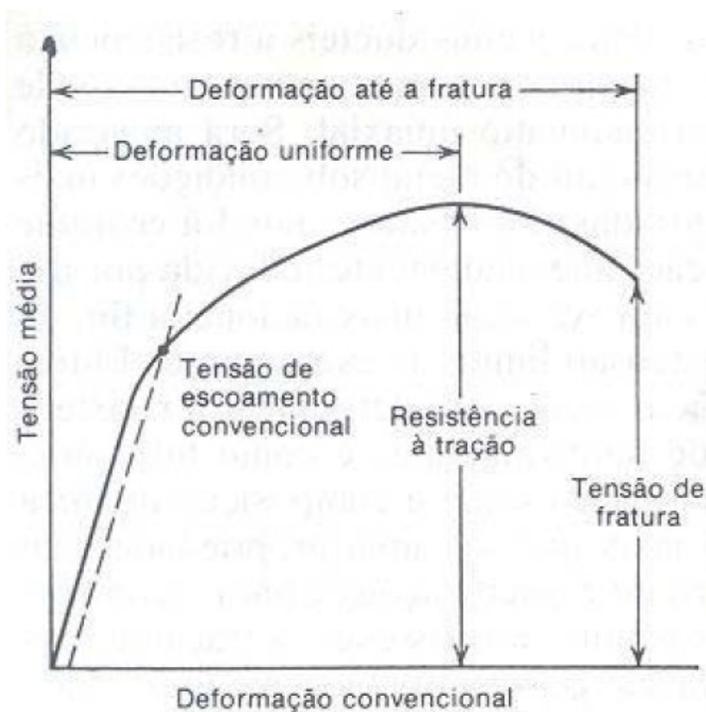


Figura 26: Curva tensão – deformação de engenharia [43].

A forma e a magnitude de uma curva tensão deformação de um metal dependerão de sua composição, tratamento térmico, história anterior da deformação plástica e da taxa de deformação, temperatura e estado de tensões impostas durante o teste. Ainda segundo Dieter [43], os parâmetros que são usados para descrever a curva tensão deformação de um metal são: resistência à tração, tensão limite de escoamento, alongação percentual e redução de área. Os dois primeiros sendo parâmetros de resistência e os dois últimos relativos à ductilidade do material.

Dieter [43] faz ainda uma descrição do comportamento do material quando este ultrapassa o valor correspondente ao limite de escoamento. Segundo ele, a partir deste ponto, o material está permanentemente deformado se a carga for reduzida a zero, de forma que a tensão para produzir cada vez mais deformação plástica cresce com o aumento desta última, devido ao encruamento do material. Ainda segundo o autor, o volume do corpo de prova permanece constante durante a deformação plástica e, conforme se alonga, a área da seção reta transversal decresce uniformemente ao longo do comprimento útil do corpo de prova. Inicialmente o encruamento compensa a diminuição da área da seção reta do transversal, e a tensão de engenharia continua a aumentar com o aumento da deformação.

Eventualmente, atinge-se um ponto onde a diminuição da área da seção reta do corpo de prova é maior que o aumento da carga de deformação proveniente do encruamento.

Essa condição será atingida primeiramente em algum ponto do corpo de prova que é ligeiramente mais fraco que, de forma que toda a deformação plástica posterior será concentrada nessa região, onde o corpo de prova começará a formar um pescoço e a se afinar localizadamente.

Devido ao fato da área da seção reta diminuir agora mais rapidamente do que o aumento da carga de deformação pelo encruamento, a carga necessária para deformar o corpo de prova diminuirá e a tensão de engenharia igualmente continuará a cair até atingir a fratura, conforme descreve Dieter [43].

2.9 Desenvolvimento do Dispositivo para Estampagem Incremental

O dispositivo utilizado para prender a chapa de alumínio, também chamado de prensa chapas, é um dispositivo de fixação de forma manual e possui uma base fixa para prender sobre a mesa da máquina CNC, duas colunas de apoio, uma base superior para apoiar a chapa a ser conformada, uma chapa sobreposta (que pode ser usada em baixo ou em cima da chapa de alumínio a ser estampada) e uma chapa superior onde estão os parafusos de fixação da chapa de alumínio. Todo este dispositivo vai preso sobre a mesa do centro de usinagem CNC, conforme idealização do projeto de acordo com DUFLOU [46], com ajuste e fixação da chapa feita de forma manual, através de parafusos, conforme pode ser observado na figura 27.

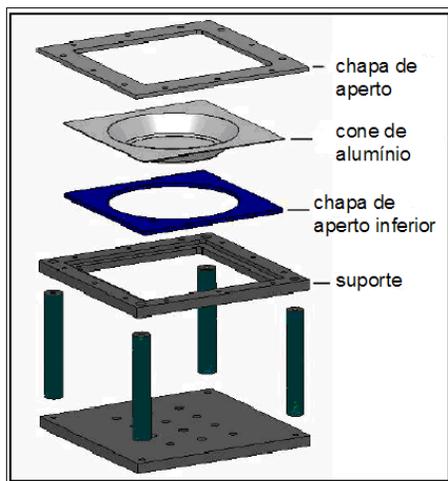


Figura 27: Idealização inicial do dispositivo prensa-chapas [46].

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Experimento Preliminar

No primeiro experimento realizou-se a estampagem incremental de uma chapa de alumínio plana com 0,5 mm de espessura e rugosidade superficial de 0,50 μm . Nesta chapa foi estampado o formato de um prato. Realizaram-se também a descrição de todos os componentes do processo de estampagem incremental e suas funções e extraíram-se os primeiros resultados do experimento prático.

3.1.1 Máquina Utilizada para Estampagem Incremental

Usa-se uma máquina CNC para fazer a estampagem incremental (figura 28), o motivo da escolha deve-se a: disponibilidade desta máquina, fácil programação, fácil manuseio, tamanho da peça, forma construtiva, capacidade do comando.



Figura 28: Centro de usinagem discovery modelo 4022, romi com comando MACH9.

A Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina - SATC tem de um centro de usinagem com características adequadas para a estampagem incremental. Na tabela 2 são apresentadas as características técnicas desta máquina.

Tabela 2: Características do centro de usinagem discovery 4022.

Curso Longitudinal eixo X	599 mm
Curso transversal eixo Y	406 mm
Curso vertical eixo Z	508 mm
Cone da árvore	ISO 40
Potência do motor principal	7,5 CV
Faixa de rotação	60 a 6.000 rpm
Avanço rápido dos eixos X, Y e Z	15/15/15 m/mim
Dimensões da mesa	360 x 840 mm
Potência	15 kVA
Comando CNC	Mach - 9

A tabela 3 compara as características do centro de usinagem ROMI Discovery 4022 utilizado para os testes práticos com a máquina utilizada por Kopac [12], um centro de usinagem Mori Seiki, em seus testes.

Tabela 3: Características da máquina CNC.

Características Técnicas	ROMI Discovery 4022	Mori Seiki
Movimento Rápido	X, Y: 20 m/min	X,Y: 20 m/min
Avanço Máximo (mm/min)	4000	5000
Tipo/Classe de cone porta ferramenta	BT-40	BT-40
Número de ferramentas no magazine	22	20
Resolução de Posicionamento	0.001	0.001
CNC	Mach 9, 3 eixos de posicionamento, interpolação linear e circular	Fanuc MSC-521, 3 eixos de posicionamento, interpolação linear e circular

3.1.2 Dispositivo Prensa Chapas

Após estudo bibliográfico [46] sobre o dispositivo prensa chapas foi realizado o projeto e desenhos detalhados para a fabricação do mesmo. Em seguida foi fabricado o dispositivo prensa chapas figura 29, que é formado por uma base, duas colunas de sustentação e duas chapas superiores formando o prensa chapas. Em um primeiro momento a chapa será presa diretamente por parafusos que apoiaram diretamente sobre a chapa.



Figura 29: Dispositivo prensa chapas.

3.1.3 Ferramenta de Estampagem

Usou-se uma ferramenta de metal duro com ponta esférica [21]. O diâmetro da ferramenta é de 10 mm e comprimento útil de 80 mm conforme figura 30.



Figura 30: Ferramenta de estampagem incremental.

O acabamento superficial da ferramenta utilizada nos testes de estampagem é usinado, (acabamento de torno CNC). A ferramenta foi presa em um dispositivo chamado mandril, usado para fixar ferramentas em centros de usinagem CNC, figura 31.



Figura 31: Ferramenta presa no mandril.

3.1.4 Fixação do Dispositivo Prensa Chapas no Centro de Usinagem CNC

O dispositivo prensa chapas foi fixado sobre a mesa do centro de usinagem através de quatro parafusos e alinhado com relógio comparador (figura 32) a fim de deixar a parte superior do dispositivo alinhado com a mesa do centro de usinagem CNC, permitindo, desta forma, centrar a ferramenta no centro do prensa chapas.

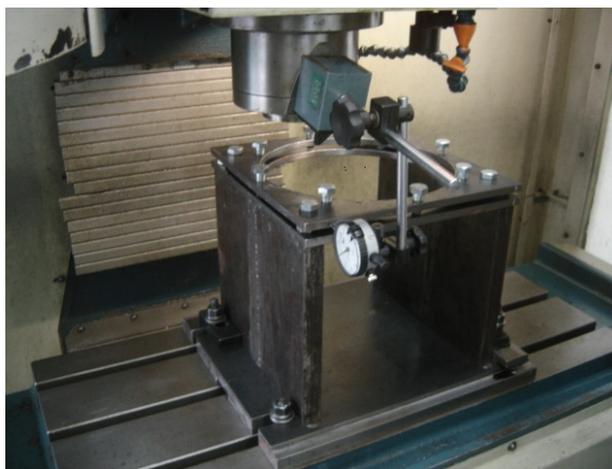


Figura 32: Montagem do prensa chapas na máquina CNC.

3.1.5 Fixação da Chapa no Dispositivo Prensa Chapas

A chapa de alumínio a ser conformada é presa no dispositivo prensa chapas através de oito parafusos, que pressionam uma chapa de aço sobreposta na chapa de alumínio. Desta forma a fixação torna-se mais uniforme e evita marcar a chapa a ser conformada. Os oito parafusos são apertados com a utilização de uma chave torquimetro, garantindo que o aperto seja uniforme em todos os parafusos mostrado na figura 33.

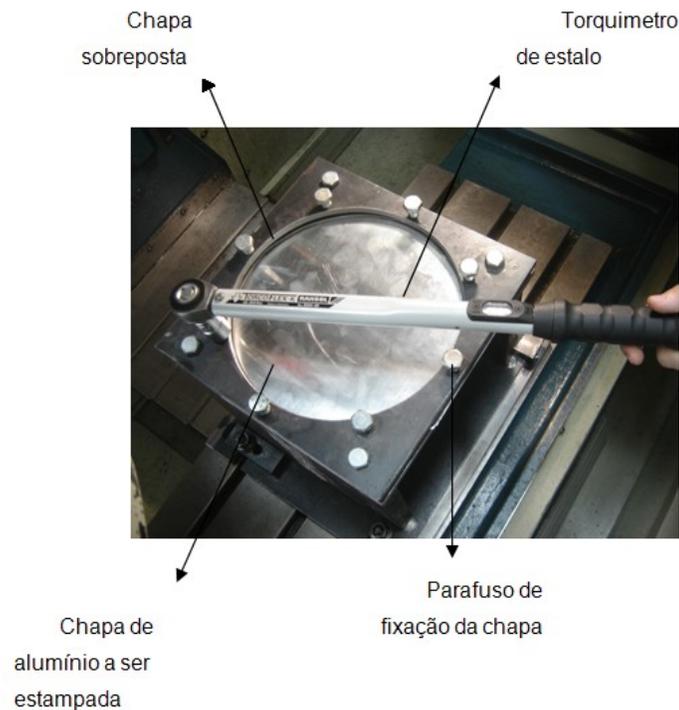


Figura 33: Chapa sendo presa no dispositivo prensa chapas.

Utilizando o torquemetro para controlar o aperto, aplicou-se para os oito parafusos de fixação da chapa a ser conformada um torque de 20 N.

3.2 Ensaio Realizados

Foram realizados três ensaios preliminares nos quais foram testados parâmetros da estampagem incremental como:

- Adequação do centro de usinagem CNC ao processo;
- Conformidade da peça com o desenho CAD;
- Aquecimento da chapa;
- Lubrificação;
- Batimento da ferramenta;
- Rugosidade da chapa antes da estampagem.

3.2.1 Projeto da Peça a ser Estampada

O material da peça que foi estampada é alumínio com espessura inicial de 0,5 mm. A peça que será estampada no primeiro experimento tem o formato de um prato com diâmetro maior de 240 mm, diâmetro menor de 162 mm, profundidade de estampagem de 40 mm, ângulo de inclinação de 45°, ver figura 34.

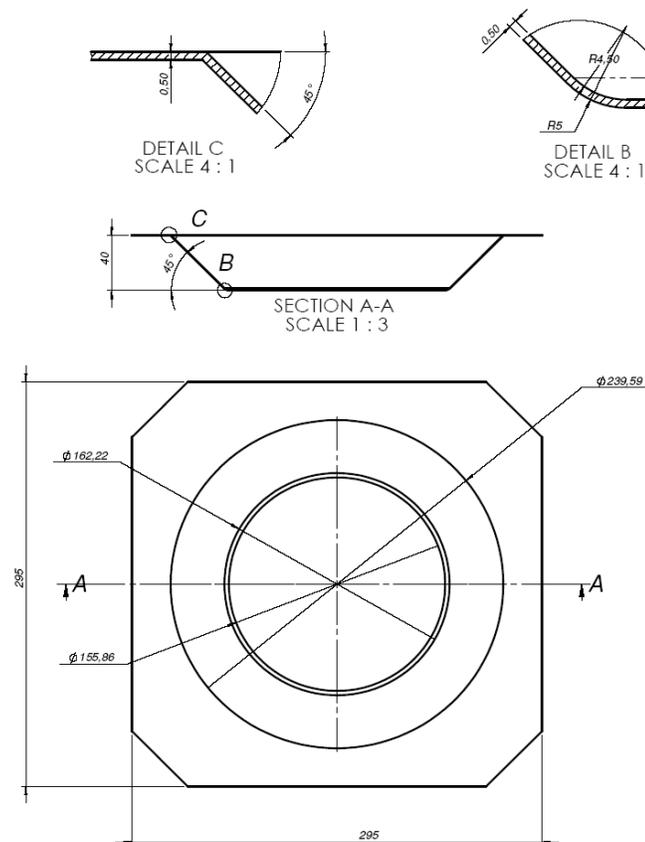


Figura 34: Projeto da peça a ser estampada.

3.2.2 Resultado do Ensaio Preliminar

A peça estampada (figuras 35 e 36) tem o formato de um prato com profundidade estampada de 40 mm, com tolerância de 0,7 mm para mais e para menos e ângulo de inclinação 45°, com tolerância de 0,7 minutos.

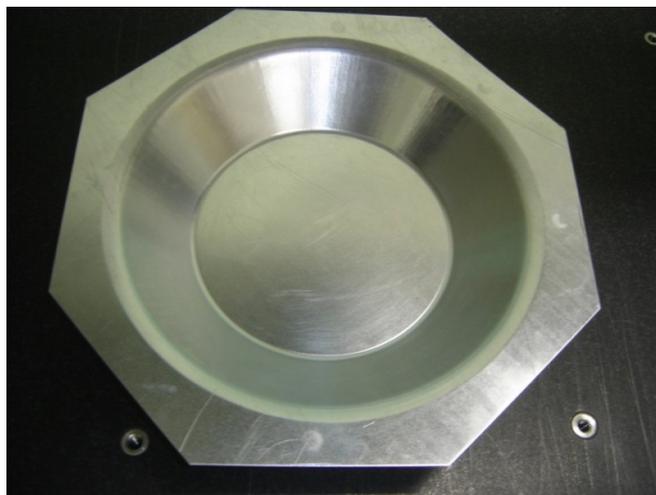


Figura 35: Fotos da peça já estampada vista superior.

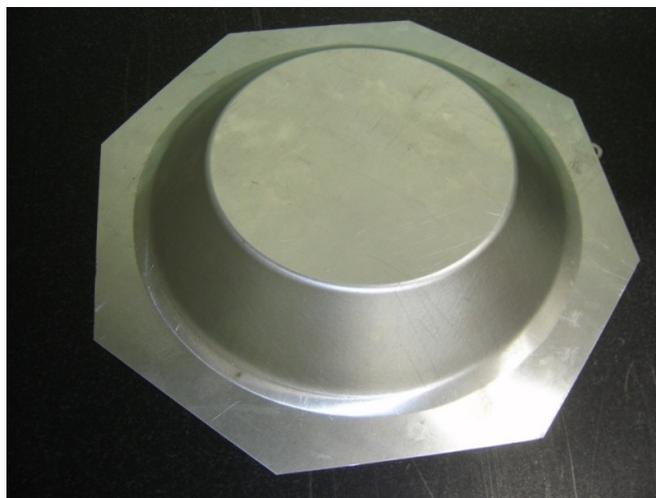


Figura 36: Fotos da peça já estampada vista inferior.

As dimensões coletadas na chapa estampada foram feitas em uma máquina de medição por coordenadas tridimensional conforme figura 37.

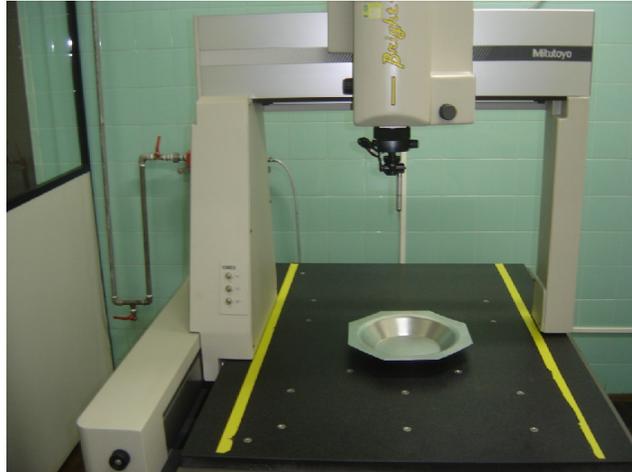


Figura 37: Medição da chapa conformada.

3.3 Parâmetros de Estampagem Coletados

Foram analisados parâmetros no ensaio de estampagem incremental realizado que interferem diretamente no processo de estampagem incremental, mudando o acabamento superficial da chapa e alterando o tempo de estampagem. Os parâmetros analisados foram:

- Velocidade de estampagem;
- Profundidade de estampagem no eixo Z;
- Rotação da ferramenta de estampagem incremental;
- Aquecimento da ferramenta e da chapa de alumínio;
- Lubrificante utilizado na estampagem;
- Excentricidade da ferramenta;
- Rugosidade superficial da chapa de alumínio.

3.3.1 Velocidade de Estampagem

A máquina CNC possibilita a regulagem precisa da velocidade de estampagem de acordo com o que foi programado. A velocidade de estampagem utilizada no primeiro ensaio foi 1200 m/minuto.

3.3.2 Profundidade de Estampagem no Eixo Z

A cada passe completo da ferramenta pela superfície da chapa de alumínio a profundidade no eixo Z sofre um acréscimo de 0,3 mm. Como se usou uma estratégia de conformação em helicoidal, a ferramenta sempre estava em contato com a ferramenta, mesmo no momento em que acontece o incremento em Z.

3.3.3 Rotação da Ferramenta de Estampagem Incremental

A rotação utilizada no primeiro teste foi contínua do início ao fim, mantendo a ferramenta girando a 2000 rpm.

3.3.4 Aquecimento da Ferramenta e da Chapa de Alumínio

A temperatura durante o processo de estampagem incremental pode influenciar bastante nos resultados obtidos, por isto há uma necessidade de se controlar esta temperatura. Usou-se um aparelho de medir temperatura a laser (figura 38) para coletar este dado. Coletou-se temperatura no início do processo, durante e no final do processo, percebeu-se que a temperatura manteu-se sempre a mesma, temperatura ambiente.



Figura 38: Coleta da temperatura durante o processo de estampagem incremental.

3.3.5 Lubrificante Utilizado na Estampagem

Utilizou-se na estampagem incremental a graxa a base de lítio especial para rolamentos, aplicada intermitentemente com o auxílio de um pincel durante todo o processo de estampagem incremental (figura 39).



Figura 39: Aplicação de lubrificante no processo de estampagem incremental.

3.3.6 Excentricidade da Ferramenta

A excentricidade da ferramenta analisa como está a fixação da mesma na máquina CNC, verificando se o seu corpo giro centrado em torno dele mesmo. Para analisar este dado é necessário o uso de um relógio comparador preso na mesa da máquina CNC e em contato com a ferramenta de estampagem (figura 40). Gira-se com a mão o eixo árvore da máquina e faz-se a leitura no relógio comparador com escala em milímetros e precisão de 0,01mm.

Coletou-se uma excentricidade de 0,04 mm na ponta da ferramenta. Este resultado interfere diretamente no acabamento superficial da peça estampada incrementalmente.



Figura 40: Medição da excentricidade da ferramenta.

3.3.7 Rugosidade Superficial da Chapa de Alumínio

A rugosidade superficial da chapa, antes de ser estampada de forma incremental, foi medida com um rugosímetro digital conforme figura 41 e a dimensão coletada é de 0,50 μm .



Figura 41: Medição da rugosidade da chapa a ser estampada.

O aparelho utilizado na medição da rugosidade é o rugosímetro portátil TR100 Digimess, com as seguintes características:

- Parâmetros medidos: Ra e Rz;
- Capacidade de medição: Ra 0,05 – 10 μm , Rz 0,10 – 50 μm ;
- Curso de medição: 6 mm;
- Cut off: 0,25 – 0,80 – 2,50 mm;
- Velocidade de medição: 1 mm/s;

- Sensor: sistema piezoelétrico;
- Raio da ponta: 10 μm ;
- Força de medição: $< 0,016 \text{ N}$;
- Calibração feita pelo teclado e um bloco padrão para calibração.

4 CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE ALUMÍNIO

4.1 Determinação das Propriedades Mecânicas da Chapa de Alumínio

A chapa usada no teste preliminar tem espessura de 0,5 mm, e o seu material é alumínio. Esta possui uma tensão de escoamento de aproximadamente 40 MPa e tensão de resistência a tração de aproximadamente 110 MPa. Estima-se, segundo as ligas de alumínio consultadas que a chapa tenha a seguinte composição química: 1,2% Mn, 0,12% Cu e o restante alumínio [32]. Para entender melhor o seu comportamento durante o processo de estampagem incremental e poder determinar algumas variáveis do processo com antecedência como:

- Limite de resistência;
- Limite de escoamento;
- Encruamento;
- Anisotropia;
- Composição química da chapa;
- Curva limite de conformação;
- Profundidade máxima de estampagem incremental.

É necessária a realização de alguns ensaios preliminares para a obtenção de resultados concretos e mecânicos sobre o material em questão.

4.2 Definição das Características Mecânicas

O ensaio mais usado para a determinação das propriedades mecânicas de chapas é o ensaio de tração. Este permite obter o limite de resistência, o limite de escoamento, o grau de encruamento e o índice de anisotropia [7].

O ensaio de tração é um teste uniaxial e sem atrito. É efetuado em máquinas que têm uma garra fixa e uma garra móvel para pegar e estirar o corpo de prova. O ensaio é efetuado com velocidade constante. As máquinas são equipamentos com sensores para registrar a força

F e o alongamento ΔL do corpo de prova. O fim do ensaio é marcado pela ruptura do corpo de prova [7]. O resultado do ensaio é emitido através da figura 44.

Para testes de chapas metálicas são usados diferentes comprimentos, larguras e formato dos corpos de prova (com cabeça e sem cabeça). Para teste com espessura de 0,1 mm até 3 mm são freqüentemente usados corpos de prova em forma de tiras de chapa de 20 mm de largura por 250 mm de comprimento. Estes são fixados na garra da máquina, deixando no mínimo 140 mm livre. Este tipo de corpo de prova pode ser produzido facilmente cortando as tiras em uma guilhotina e retificando os cantos em uma retificadora plana para eliminar as trincas causadas durante o cisalhamento. A eliminação das trincas é importante porque elas podem causar uma ruptura prematura durante o ensaio [7].

Para o ensaio de tração no sentido de laminação o corpo de prova foi retirado no sentido de laminação da chapa de alumínio puro.

Dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios de tração foram usinados conforme norma ABNT 6673[44], equação 2.2 calculo da área inicial:

(eq. 2.2)

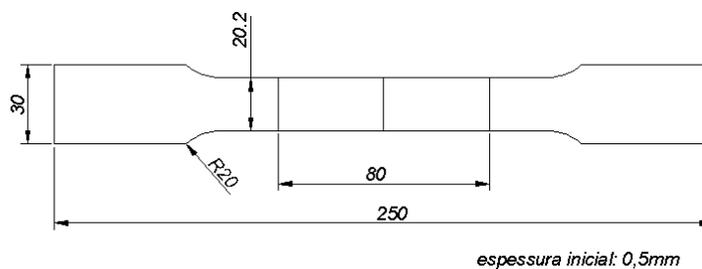


Figura 42: Desenho do corpo de prova.



Figura 43: Corpo de prova usinado.

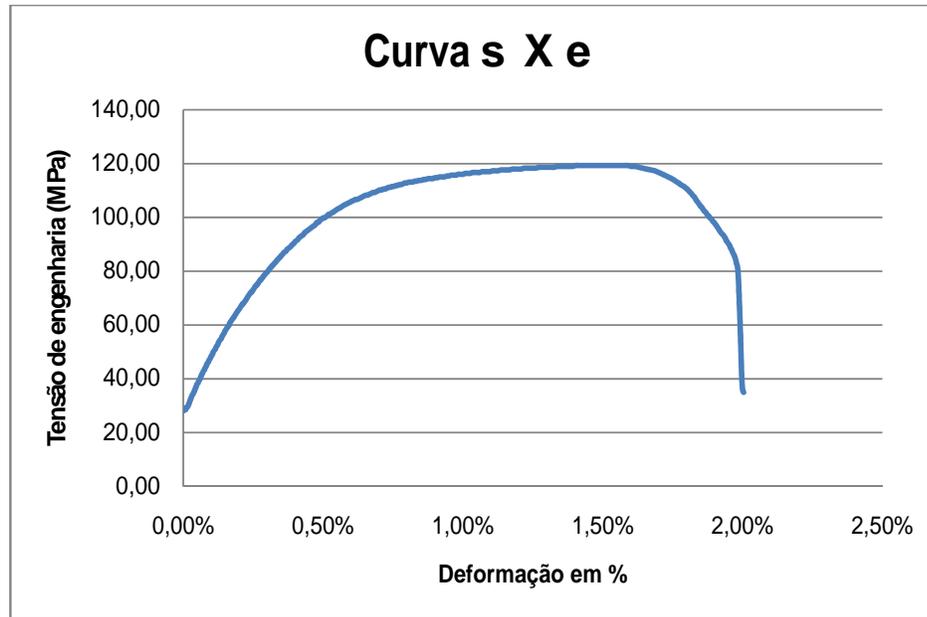


Figura 44: Curva tensão de engenharia pela deformação

Para traçar a curva da figura 44 foram extraídos os resultados obtidos no ensaio de tração, a máquina de tração após o ensaio, mostra um numero elevado de valores referente aos pontos medidos durante o ensaio. Colocando estes valores no programa microsoft excel podemos traçar a curva conforme figura 44.

4.3 Tensão de Escoamento

A tensão de escoamento foi obtida através de valores retirados do ensaio de tração (K_f e f), estes valores foram colocados no microsoft excel, gerando assim a curva tensão de escoamento do alumínio puro. A curva de escoamento obtida é mostrada na Figura 45.

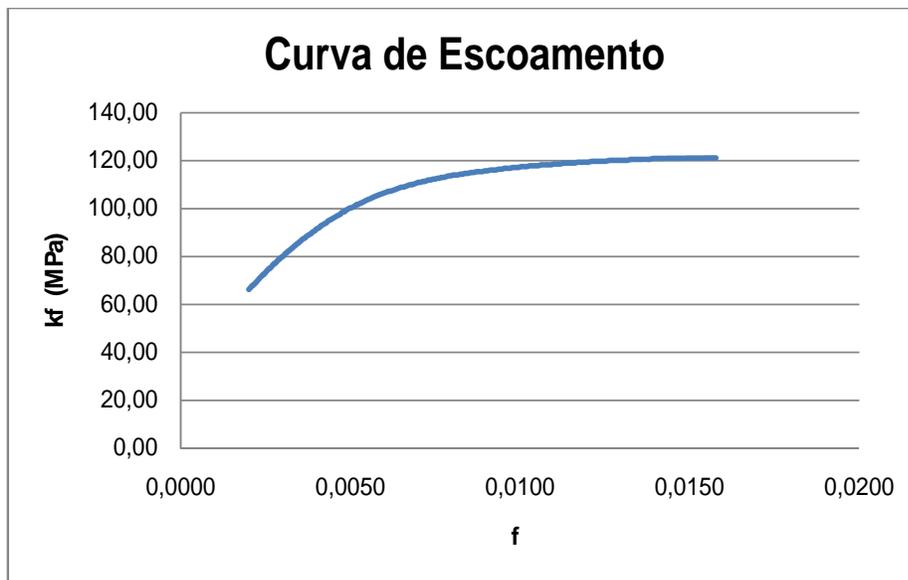


Figura 45: Curva de escoamento do alumínio puro (99,33% Al).

4.4 Ensaio Metalográfico

A análise metalográfica conforme figura 46 revelou a matriz de alumínio solução sólida α com diversos dispersóides, onde os pontos pretos são os microconstituintes. Pode-se perceber também o sentido da laminação através do alinhamento das impurezas.

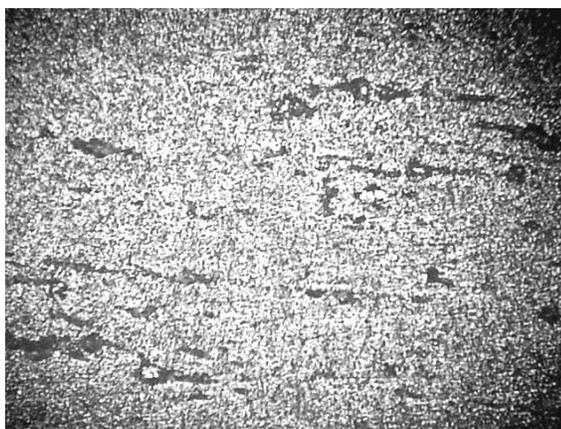


Figura 46: Análise metalográfica do alumínio laminado.

4.5 Análise Química

A análise química do Alumínio Laminado retornou os seguintes elementos (%):
Si=0,07; Fe=0,41; Cu=0,13; Mn=0,03; Mg<0,01; Zn<0,005; Ni<0,01; Cr<0,005; Pb<0,01;
Sn<0,01; Ti=0,017; P=0,0013; Al=99,33.

5 ANÁLISE DOS ENSAIOS

Foram realizados nove ensaios, no qual foram extraídos alguns dados a respeito do processo, da matriz, punção e do comportamento da chapa de alumínio.

5.1 Testes de Estampagem

Os testes práticos de estampagem foram necessários para o estudo científico do tema, proporcionando uma comparação entre a literatura e a prática. Facilitando desta forma a percepção e análise detalhada da estampagem incremental.

5.1.1 Teste de Estampagem N°1

No primeiro ensaio foram analisadas o funcionamento da matriz, da ferramenta, se a máquina tinha condições de realizar os ensaios e coletou-se alguns dados importantes. A profundidade total deste primeiro ensaio foi de 10 mm.

Dados da Estampagem:

- Tempo total de estampagem: 01h e 35 min;
- Formato geométrico tipo cone;
- Ângulo de inclinação da peça a ser conformada de 45°;
- Ferramenta: Ø 10 mm, ponta esférica (ball nose);
- Material da ferramenta: aço 4340;
- Material da chapa: alumínio;
- Profundidade da Superfície cônica: 20 mm;
- Espessura da chapa: 0,5 mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling);
- Profundidade de estampagem (passo vertical da ferramenta): 0,2 mm;
- Avanço da mesa XY: 500 mm/min;
- Rotação do eixo árvore: 2000 RPM.

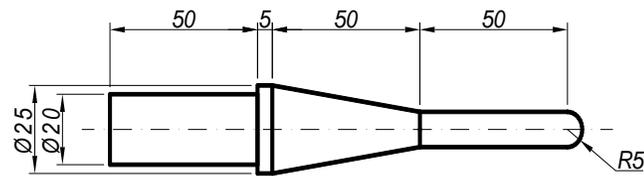


Figura 47: Ferramenta de estampagem incremental.

A ferramenta de estampagem incremental foi usinada em um torno CNC com as dimensões da figura 47.

5.1.2 Teste Estampagem N°2

Foram alterados os seguintes parâmetros:

- O incremento vertical (eixo Z) da ferramenta, que era de 0,2 mm, foi aumentado para 0,3 mm;
- A profundidade total foi de 40 mm;
- A velocidade de avanço dos eixos X e Y (mesa da máquina) foi aumentada para 1000 mm/min;
- A rotação foi zerada (0 RPM);
- A ferramenta foi substituída por uma de metal duro com ponta esférica. O diâmetro da ferramenta é de 10 mm e comprimento útil de 80 mm;
- A ferramenta foi substituída por uma de metal duro com ponta esférica. O diâmetro da ferramenta é de 10 mm e comprimento útil de 80 mm (figura 48).



Figura 48: Nova ferramenta utilizada no ensaio.

Resumo dos dados da estampagem N°2:

- Tempo total de estampagem: 01h e 05 min;
- Formato geométrico tipo cone;
- Ângulo de inclinação da peça a ser conformada 45°;
- Ferramenta: \varnothing 10 mm, ponta esférica (ball nose);
- Material da ferramenta: metal-duro, classe K;
- Material da chapa: alumínio;
- Profundidade da Superfície cônica: 40 mm;
- Espessura da chapa: 0,5 mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling);
- Profundidade de estampagem (passo vertical da ferramenta): 0,5 mm;
- Avanço da mesa XY: 1000 mm/min;
- Rotação do eixo árvore: 0 RPM.

5.1.3 Teste de Estampagem N°3

Dados da estampagem:

- Tempo total de estampagem: 25 min;
- Formato geométrico tipo cone;
- Ângulo de inclinação da peça a ser conformada 45°;
- Ferramenta: \varnothing 10 mm, ponta esférica (ball nose);
- Profundidade total 40 mm;
- Material da ferramenta: metal-duro;
- Material da chapa: alumínio;
- Profundidade da Superfície cônica: 40 mm;
- Espessura da chapa: 0,5 mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling), com deslocamento helicoidal e contato constante e ininterrupto entre a ferramenta e a chapa (blank);
- Incremento vertical: 0.3 mm;
- Avanço (deslocamento interpolando X, Y e Z): 1.500 mm/min;
- Rotação da ferramenta: 0 RPM. O eixo árvore permaneceu livre durante o ensaio.

5.1.4 Teste de Estampagem N°4

Dados da estampagem:

- Tempo total de estampagem: 25 min;
- Ângulo de inclinação da peça a ser conformada 45°;
- Formato geométrico tipo cone;
- Profundidade total 50 mm;
- Ferramenta: \varnothing 10 mm, ponta esférica (ball nose);
- Material da ferramenta: metal-duro;
- Material da chapa: alumínio;
- Profundidade da Superfície cônica: 40 mm;
- Espessura da chapa: 0,5 mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling), com deslocamento helicoidal e contato constante e ininterrupto entre a ferramenta e a chapa (blank);
- Incremento vertical: 0,3 mm;
- Avanço (deslocamento interpolando X, Y e Z): 1.500 mm/min;
- Rotação da ferramenta: 0 RPM. O eixo árvore permaneceu livre durante o ensaio.

5.1.5 Teste de Estampagem N°5

Dados da estampagem:

- Tempo total de estampagem: 25 min;
- Ângulo de inclinação da peça a ser conformada 45°;
- Formato geométrico tipo cone;
- Profundidade total 80 mm;
- Ferramenta: \varnothing 10 mm, ponta esférica (ball nose);
- Material da ferramenta: metal-duro;
- Material da chapa: alumínio;
- Profundidade da Superfície cônica: 40 mm;
- Espessura da chapa: 0,5 mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling), com deslocamento helicoidal e contato constante e ininterrupto entre a ferramenta e a chapa (blank);

- Incremento vertical: 0,3 mm;
- Avanço (deslocamento interpolando X, Y e Z): 1.500 mm/min;
- Rotação da ferramenta: 0 RPM. O eixo árvore permaneceu livre durante o ensaio.

5.1.6 Teste de Estampagem N°6

Dados da estampagem:

- Tempo total de estampagem: 25 min;
- Ângulo de inclinação da peça a ser conformada 60°;
- Formato geométrico tipo cone;
- Profundidade total 45 mm;
- Ferramenta: Ø 10 mm, ponta esférica (ball nose);
- Material da ferramenta: metal-duro;
- Material da chapa: alumínio;
- Profundidade da Superfície cônica: 40 mm;
- Espessura da chapa: 0,5 mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling), com deslocamento helicoidal e contato constante e ininterrupto entre a ferramenta e a chapa (blank);
- Incremento vertical: 0,3 mm;
- Avanço (deslocamento interpolando X, Y e Z): 1.500 mm/min;
- Rotação da ferramenta: 0 RPM. O eixo árvore permaneceu livre durante o ensaio.

5.1.7 Teste de Estampagem N°7

Dados da estampagem:

- Tempo total de estampagem: 25 min;
- Ângulo de inclinação da peça a ser conformada 50°;
- Formato geométrico tipo cone;
- Profundidade total 80 mm;
- Ferramenta: Ø 10 mm, ponta esférica (ball nose);
- Material da ferramenta: metal-duro;
- Material da chapa: alumínio;

- Profundidade da Superfície cônica: 40 mm;
- Espessura da chapa: 0,5 mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling), com deslocamento helicoidal e contato constante e ininterrupto entre a ferramenta e a chapa (blank);
- Incremento vertical: 0,3 mm;
- Avanço (deslocamento interpolando X, Y e Z): 1.500 mm/min;
- Rotação da ferramenta: 0 RPM. O eixo árvore permaneceu livre durante o ensaio.

5.1.8 Teste de Estampagem N°8

Dados da estampagem:

- Tempo total de estampagem: 25 min;
- Ângulo de inclinação da peça a ser conformada 60°;
- Formato geométrico tipo cone arredondado;
- Profundidade total 60 mm;
- Ferramenta: Ø 10 mm, ponta esférica (ball nose);
- Material da ferramenta: metal-duro;
- Material da chapa: alumínio;
- Profundidade da Superfície cônica: 40 mm;
- Espessura da chapa: 0,5 mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling), com deslocamento helicoidal e contato constante e ininterrupto entre a ferramenta e a chapa (blank);
- Incremento vertical: 0,3 mm;
- Avanço (deslocamento interpolando X, Y e Z): 1.500 mm/min;
- Rotação da ferramenta: 0 RPM. O eixo árvore permaneceu livre durante o ensaio.

5.1.9 Teste de Estampagem N°9

Dados da estampagem:

- Tempo total de estampagem: 25 min;
- Ângulo de inclinação da peça a ser conformada 50°;
- Formato geométrico tipo cone arredondado;

- Profundidade total 60 mm;
- Ferramenta: \varnothing 10 mm, ponta esférica (ball nose);
- Material da ferramenta: metal-duro;
- Material da chapa: alumínio;
- Profundidade da Superfície cônica: 40 mm;
- Espessura da chapa: 0,5 mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling), com deslocamento helicoidal e contato constante e ininterrupto entre a ferramenta e a chapa (blank);
- Incremento vertical: 0,3 mm;
- Avanço (deslocamento interpolando X, Y e Z): 1.500 mm/min;
- Rotação da ferramenta: 0 RPM. O eixo árvore permaneceu livre durante o ensaio.

6 ANÁLIZE DE RESULTADOS E DISCURSÕES

Nesta bateria de 9 testes de estampagem incremental, um dos parâmetros mudado e analisado, conforme a tabela 4, que mostra a mudança do ângulo de parede e a consequência desta mudança. Observaram-se um dos limites do processo de estampagem incremental do alumínio em função da mudança do ângulo de inclinação da parede da peça estampada.

Tabela 4: Análise da inclinação do ângulo de parede da peça estampada.

Testes	Diâmetro da ferramenta	Profundidade de estampagem	Ângulo de inclinação da parede	Material de construção de ferramenta	Situação da peça estampada
Nº 1	10 mm	20 mm	45°	Aço 4340	Normal
Nº 2	10 mm	40 mm	45°	Metal duro classe K	Normal
Nº 3	10 mm	40 mm	45°	Metal duro classe K	Normal
Nº 4	10 mm	50 mm	45°	Metal duro classe K	Normal
Nº 5	10 mm	80 mm	45°	Metal duro classe K	Normal
Nº 6	10 mm	45 mm	60°	Metal duro classe K	Rompimento
Nº 7	10 mm	40 mm	50°	Metal duro classe K	Normal
Nº 8	10 mm	60 mm	60°	Metal duro classe K	Rompimento
Nº 9	10 mm	40 mm	50°	Metal duro classe K	Normal

No teste Nº6 e Nº8 aconteceram problemas em função do ângulo de inclinação e da profundidade da peça a ser estampada. A peça rompeu durante a estampagem de acordo com a (figura 49). Já no teste de Nº 6 a chapa rompeu muito pouco, pois a profundidade máxima permitida é de aproximadamente 35 mm antes do rompimento conforme o constatado.



Figura 49: Foto do teste de N°8.

6.1 Análise das Propriedades Mecânicas

Apesar de estar utilizando chapas de alumínio puro (99,33 %) que, a princípio, não oferecem boas condições de estampabilidade, pois para a mesma solicitação mecânica, a deformação na espessura será maior que na largura ($r_m > 1$) [5]. O processo de estampagem incremental para chapas de 0,5 mm de espessura apresentou algumas vantagens:

- a) Profundidade alcançada foi de 80 mm, permitindo grandes deformações, considerando-se sua anisotropia, ou seja, apresenta boa ductilidade;
- b) Menor tempo gasto para a estampagem, pois utilizou-se passos verticais de até 1 mm e velocidades de avanço de até 1.500 mm/min;
- c) Pouco esforço feito pelo eixo Z da máquina CNC, já que o material oferece pouca resistência à deformação, se comparado com aço [29], exemplo:
- d) ($E_{Al} \cong 69.000 MPa$; $E_{Aços} \cong 196.000 MPa$);
- e) Pequenas discrepâncias geométricas entre o modelo CAD e a peça real (baixo retorno elástico).

6.2 Medição e Cálculo da Deformação Através da Visioplasticidade

De acordo com as análises realizadas através da técnica de visioplasticidade figura 50 foi possível determinar as três deformações principais ocorridas na chapa. Os cálculos estão demonstrados abaixo:

a) Dados iniciais:

- Chapa do teste de estampagem nº 04;
- Espessura inicial da chapa: 0,5 mm;
- \varnothing inicial (parte não estirada): 12,75 mm;
- \varnothing parte estirada: 18,65 mm;
- Medições obtidas na linha central da chapa, transversais ao sentido de laminação.

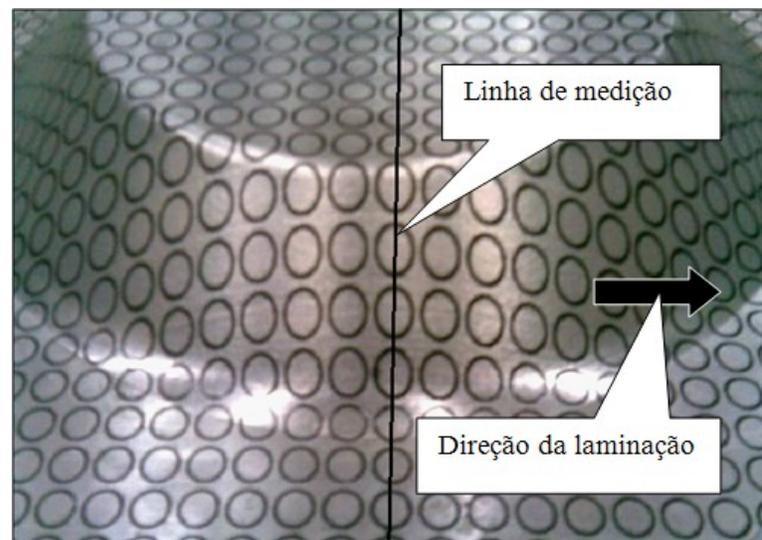


Figura 50: Grade de círculos feita através da técnica de silk-screen (serigrafia).

b) Equação 2.3 deformações nas direções de laminação:

$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad \varphi_2 = \ln \frac{l_2}{l_0} \quad \varphi_3 = \ln \frac{S_1}{S_0} \quad (\text{eq. 2.3})$$

onde:

φ_1 = deformação na direção do estiramento (adimensional);

φ_2 = deformação transversal ao estiramento (adimensional);

φ_3 = deformação na espessura da chapa (adimensional);

l_0 = dimensão inicial do corpo de prova;

l_1 = dimensão final do corpo de prova, na direção do estiramento;

l_2 = dimensão final do corpo de prova, transversal ao estiramento.

Fazendo a substituição de acordo com a medição dos círculos, as equações ficam:

(eq. 2.4)

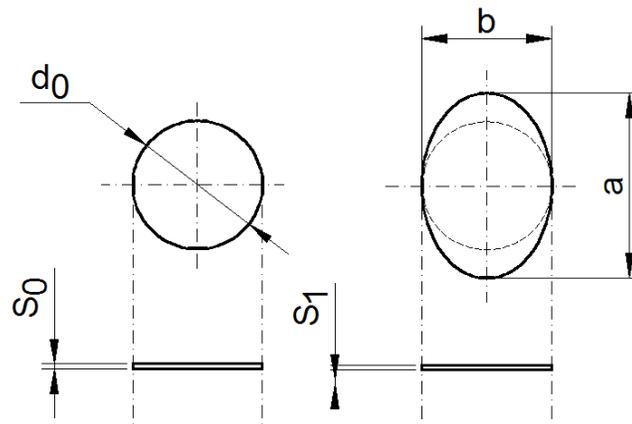


Figura 51: Método de medição dos círculos.

onde:

d_0 = diâmetro inicial do círculo impresso na chapa plana;

S_0 = área inicial da seção transversal da chapa antes do estiramento;

b = diâmetro do círculo impresso, transversal à direção de estiramento;

a = diâmetro do círculo impresso, longitudinal à direção de estiramento;

S_1 = área final da seção transversal da chapa após o estiramento.

c) Cálculo das deformações através da visioplasticidade:

Medições realizadas:

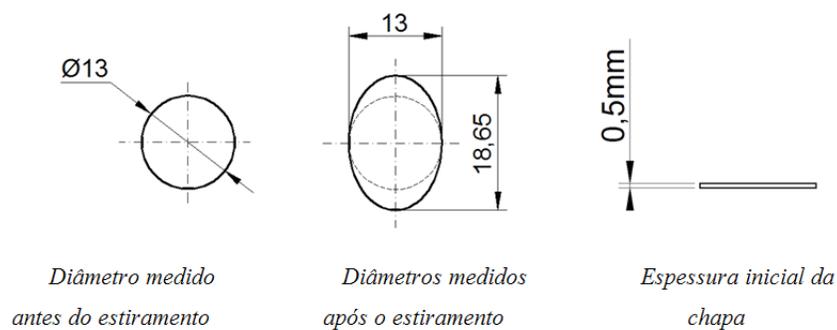


Figura 52: Medição realizada nos círculos.

Fazendo a medição dos círculos gravados na chapa estampada e escrevendo estes valores na equação 2.4 temos os valores:

$$\varphi_3 = -0,15$$

como $\varphi_2 = 0$ então trata-se de deformação plana, conforme a figura 53.

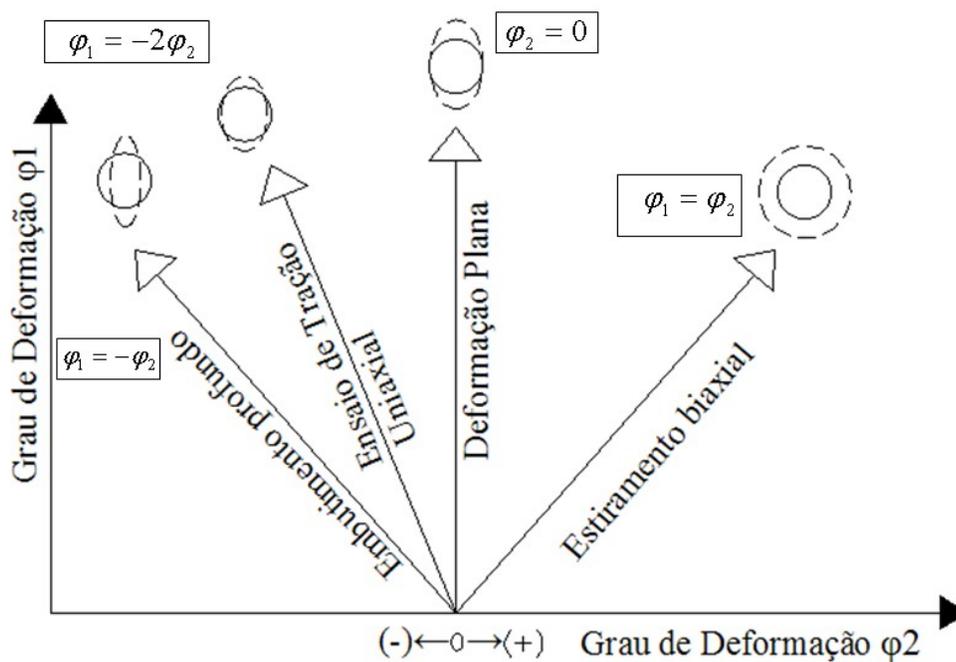
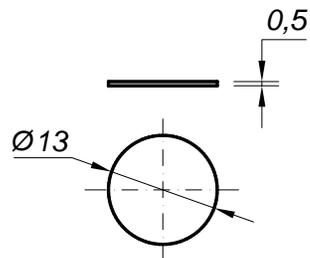


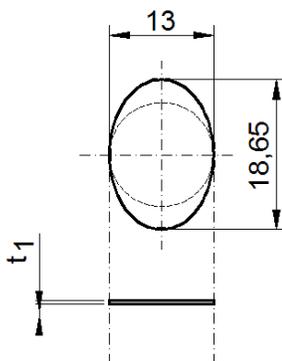
Figura 53: Tipos de deformação de chapas metálicas. [2]

Cálculo da área inicial S_0 , pela equação 2.5



(eq. 2.5)

Cálculo da espessura final t_1 da peça, através da equação 2.3:



Cálculo da deformação equivalente conforme equação 2.6:

$$\varphi_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} * \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2}$$

(eq. 2.6)

$$\varphi_{eq} = 0,244$$

Pode-se notar uma correspondência entre os valores obtidos através de processos diferentes, sendo o primeiro pela lei de constância de volume $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$ e outro pela lei dos senos $t_1 = t_0 * \text{sen}(90 - \alpha)$, havendo uma pequena variação, de 0,053 mm entre um cálculo e outro. Isso demonstra a validação da lei dos senos, equação 2.1 para chapas de alumínio puro (99,33 % Al), com espessura inicial de 0,5 mm e ângulo de inclinação de

parede de 45°: As duas formas de calculo são aplicáveis para a estampagem incremental de chapas em alumínio puro .

$$t_1 = 0,353mm$$

6.3 Cálculo do Índice de Anisotropia

Durante o processo de estampagem por estiramento, ocorre a deformação da microestrutura e se originam grãos mais alongados na direção da laminação. Esta característica provoca uma heterogeneidade nas propriedades das chapas. A quantificação do efeito desta deformação é realizada pelo “índice de anisotropia” (r) conforme equação 2.7. O índice de anisotropia “ r ” é definido como a razão entre as deformações principais na direção da largura (φ_b) e a deformação na espessura (φ_s) [2]:

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (\text{eq. 2.7})$$

A anisotropia apresenta valores diferentes, que dependem de como os corpos de prova são cortados em relação à direção em que o material foi laminado. A laminação modifica a orientação da estrutura cristalina dos grãos que compõem o material. O índice de anisotropia “ r ” mostra o quanto um material é heterogêneo ou não em função da direção da laminação. A realização do ensaio para a determinação do índice de anisotropia é realizado normalmente em dois ou três locais diferentes do corpo de prova, efetuando-se, posteriormente, os cálculos com um valor médio das larguras [2].

Nos experimentos práticos foram utilizadas chapas de alumínio puro laminado (chapas planas) com 0,5 mm de espessura. Através dos ensaios de tração, foram obtidos os valores de anisotropia R_0 , R_{45} , R_{90} , de acordo com o sentido de laminação da chapa:

$$R_0 = 1,05, \quad R_{45} = 1,33, \quad R_{90} = 1,95.$$

O valor médio desta propriedade foi definido através da equação 2.8:

$$r_m = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90}) = 1,42 \quad (\text{eq. 2.8})$$

6.4 Análise dos Testes de Estampagem Mudando o Diâmetro das Ferramentas

Nos últimos testes foram utilizadas ferramentas de diâmetros de 10 mm, 15 mm e 20 mm. Os demais parâmetros, tais como velocidade de avanço (1500 mm/min), profundidade de estampagem (1 mm) e estratégia helicoidal foram mantidos. O objetivo era medir a rugosidade produzida por cada ferramenta e comparar estes valores com os obtidos nos ensaios anteriores.

Através da tabela 5 e do gráfico da figura 54, pode-se analisar que na medida que aumenta-se o diâmetro da ferramenta, a rugosidade da peça estampada também aumenta.

A ferramenta com maior diâmetro não produziu um melhor acabamento, pois, devido à maior área de contato entre esta ferramenta e a chapa, houve maior esforço da máquina CNC no trabalho de conformação. Esse maior esforço provocou vibrações em todo o conjunto (máquina, ferramenta, chapa e dispositivo prensa-chapas), o que explica uma maior rugosidade da chapa estampada com a ferramenta de 20 mm.

Tabela 5: Valores de rugosidade de acordo com os diâmetros da ferramenta.

MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA FERRAMENTA				
Ferramenta (Ø mm) / Rugosidade Rz (µm)				
Ø10				
Veloc. Avanço (mm/min)	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média
1500	1,24	0,51	0,32	0,69
Ø15				
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média
1500	0,74	0,90	0,97	0,87
Ø20				
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média
1500	1	2,61	0,67	1,43

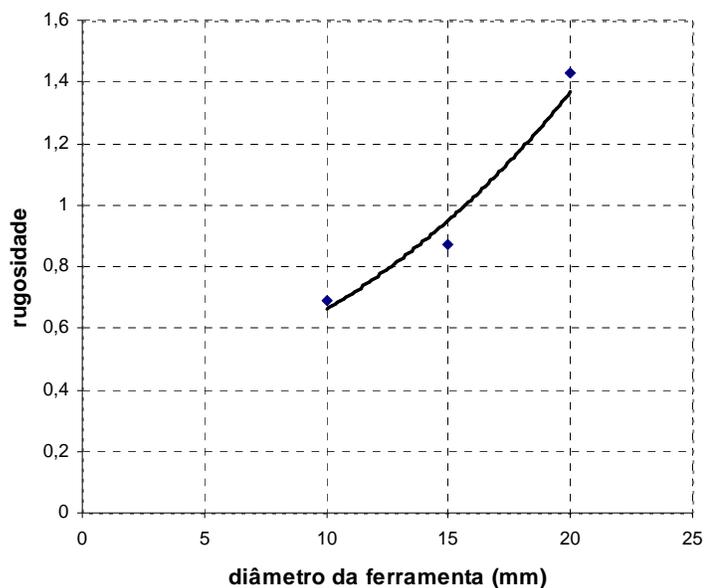
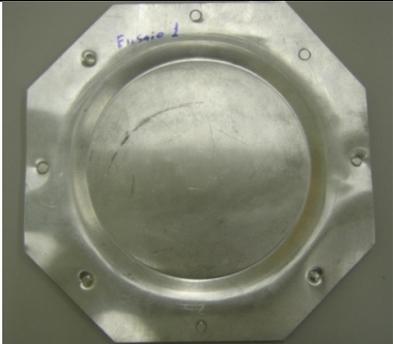
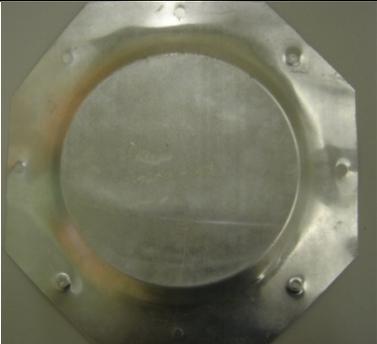


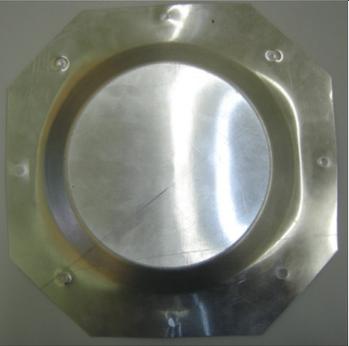
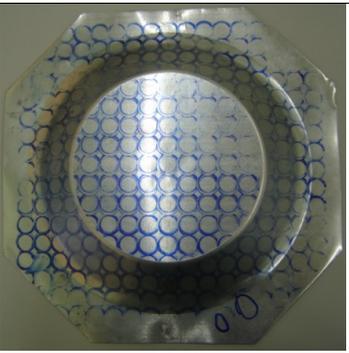
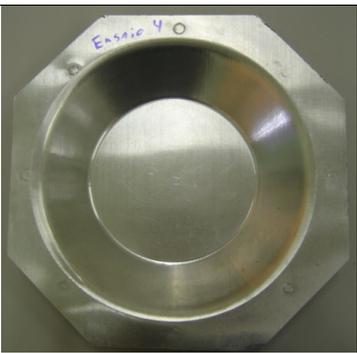
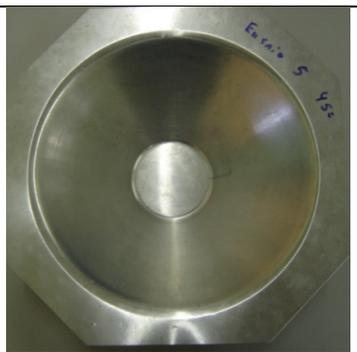
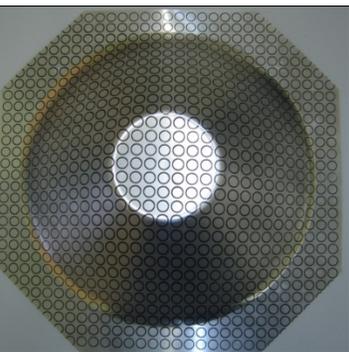
Figura 54: Gráfico de rugosidade em função dos diâmetros das ferramentas.

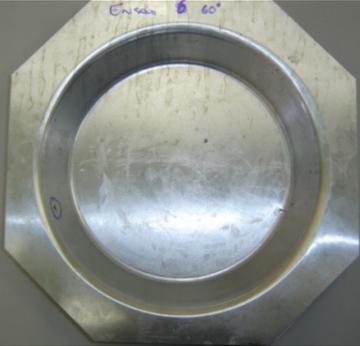
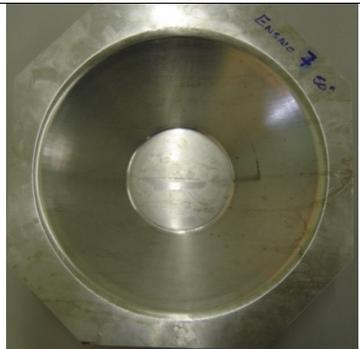
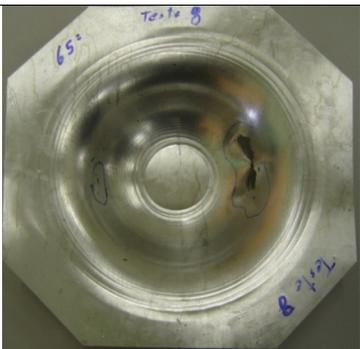
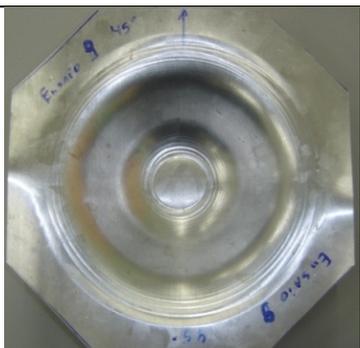
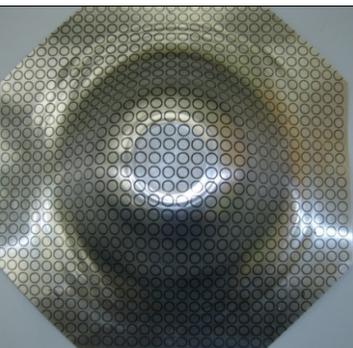
6.5 Comparação dos Testes Através das Fotos

A tabela 6 mostra o progresso da pesquisa mediante os testes realizados na prática, através das fotos dos produtos estampados, variando alguns parâmetros considerados importantes e fundamentais para o processo de estampagem incremental.

Tabela 6: Fotos dos ensaios.

Ensaio	Foto Lado 1	Foto Lado 2
Ensaio Nº1		

Ensaio N°2		
Ensaio N°3		
Ensaio N°4		
Ensaio N°5		

Ensaio N°6		
Ensaio N°7		
Ensaio N°8		
Ensaio N°9		

Na tabela 6, são mostradas as peças de uma bateria de 9 ensaios de estampagem incremental e podem ser analisadas as evoluções e resultados dos testes. Nos ensaios de N1 e

N2 notam-se as marcas dos parafusos de fixação do dispositivo prensa chapas, este problema foi resolvido colocando uma chapa sobreposta (figura 33).

Analisando o 3º ensaio destaca-se uma experiência de visioelasticidade, gravação de círculos com o próprio CNC, as gravações não ficarão boas, mas foram observados outros dados descritos no ensaio de N3.

Observando os ensaios de N4, N5, N6, N7, destacamos a profundidade de estampagem que foi mudada, a visioelasticidade em destaque e correta, a mudança do ângulo de inclinação da parede das peças estampadas (conforme marcação na peça). No ensaio de N6 percebe-se também o rompimento da peça estampada em função da mudança do ângulo de inclinação da parede.

Nos ensaios N8 e N9 observam-se precisamente a mudança na forma geométrica da peça, a visioelasticidade e o rompimento da peça no ensaio N8, também em função do ângulo de parede.

7 CONCLUSÃO

O estudo do processo de estampagem incremental em chapas de alumínio puro conclui que na medida em que se aumenta o diâmetro da ferramenta compromete-se o acabamento superficial da chapa. Quanto menor o tempo de estampagem, maior é a rugosidade e quanto menor a excentricidade da ferramenta melhor é o acabamento superficial da peça estampada.

Para melhorar o acabamento, manter a temperatura e reduzir o atrito durante a estampagem foi fundamental o uso de lubrificação. O material da ferramenta que melhor adaptou-se ao processo foi o metal duro da classe K, proporcionando melhores acabamentos.

O processo de estampagem incremental é perfeitamente aplicável na prototipagem de produtos, com geometria variável. A opção de troca de ferramentas de acordo com a necessidade do processo e da forma geométrica da peça a ser estampada. Baixo custo com ferramental e máquina para a estampagem, se comparado com a estampagem tradicional e a estampagem incremental é viável apenas para pequenos lotes de peças.

Facilidade de fabricação do dispositivo prensa chapas, porque não necessita de processos de usinagem demorados e caros, material barato de fácil aquisição.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

A Estampagem Incremental de Capas (ISF) é atualmente um processo de conformação mecânica viável apenas para peças produzidas em pequenos lotes, sujeitos a mudanças constantes, prototipagem de produtos, conformações experimentais, restauração de peças. Para aumentar o seu espectro comercial, se faz necessário desenvolver soluções que o viabilizem economicamente, permitindo sua aplicação em escala industrial. Neste caso, um dos grandes desafios é o tempo gasto em cada unidade produzida, já que em um processo de estampagem convencional, poucos segundos são necessários para a conformação.

Com relação à adaptação dos centros de usinagem para a ISF, têm-se alguns aspectos a considerar:

- a) O eixo-árvore de um equipamento CNC não foi projetado para suportar grandes esforços normais ao seu plano de trabalho, ou seja, sobre o eixo Z. Portanto, será necessário quantificar a força de estampagem aplicada na realização do processo, para não danificar o equipamento;
- b) Máquinas CNC não possuem equipamentos que possam medir as forças que estão atuando sobre cada eixo;
- c) A estrutura rígida do Centro de Usinagem não permite a manufatura de peças dentro de certas limitações geométricas.

Com relação ao conjunto ferramenta e matriz de estampagem incremental consideram-se algumas vantagens:

- a) A facilidade de fabricação do conjunto ferramenta e matriz, de acordo com o material e formato da peça a ser estampada;
- b) Redução do peso do conjunto ferramental, se comparado aos processos convencionais de estampagem;
- c) Menor desgaste do ferramental, porque o calor gerado na estampagem mostrou-se muito pequeno.
- d) Custo do conjunto muito menor que os métodos tradicionais.

Como considerações finais, destacam-se algumas vantagens da estampagem incremental:

- a) Geometrias complexas que necessitariam de moldes com alto custo podem ser obtidas com a ISF, a custos bem menores, por não utilizar conjunto de moldes no seu processo;
- b) Protótipos e peças experimentais podem ser produzidos com os materiais e métodos reais na estampagem incremental, e assim serem testados como produtos;
- c) Flexibilidade na variação geométrica do produto e a utilização de ferramental de baixo custo;
- d) Menor consumo de energia, se comparado ao consumo das máquinas de estampagem, que necessitam usar centenas de toneladas-força para gerar cada produto.

9 SUGESTÕES

Podem ser analisados e testados outros tipos de ferramentas com formatos geométricos bem diferentes que atendam aos mais diversos tipos de peças a serem estampadas. O dispositivo de fixação da chapa a ser estampada pode sofrer muitas alterações de acordo com o tipo de estampagem a ser feita.

O tipo de fluido lubrificante, o material da peça a ser estampada e o sentido de estampagem, entre outros, combinados com diferentes materiais e perfis de ferramentas, possibilitam a geração de uma série de alternativas, dentre as quais se devem escolher aquela que melhor se ajuste aos objetivos propostos.

A possibilidade de trabalharmos com troca rápida de ferramentas nos possibilitando usar vários tipos e formatos de ferramentas.

Uma interessante linha de pesquisa em projetos futuros é a estampagem incremental combinada com estampagem convencional, onde trará mais agilidade ao processo, com estampagem incremental de detalhes pequenos em peças complexas estampadas de forma convencional e de uma forma mais econômica.

10 BIBLIOGRAFIA

1. JACSON, K. P.; ALLWOOD, M. UFSC. **Incremental sheet forming research at cambridge University**. Institute for Manufacturing – University of Cambridge, Mill Lane, Cambridge, U.K. 2005.
2. SCHAEFFER, L. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 200p. p 156-159.
3. MCLOUGHLIN, K **Institute of Technology Tallaght**. Disponível em: < <http://www.irishscientist.ie> >. Acesso em: 20 de julho de 2005.
4. POHLAK, M.; KÜTTNER, R.; MAJAK, J.; KARJUST, K. & SUTT, A. **Experimental Study Of Incremental Forming Of Sheet Metal Products**. "INDUSTRIAL ENGINEERING – INNOVATION AS COMPETITIVE EDGE FOR SME" 29 - 30th April 2004, Tallinn, Estonia. International DAAAM Conference.
5. LAMMINEN, L. **Incremental sheet forming with an industrial robot - forming limits and their effect on component design**. Helsinki University of Technology. Finland. 2005.
6. CASTELÃN, J. **Utilização das técnicas cad/cam para estampagem incremental do alumínio série 1000**. 2007. 193 f. Dissertação (Mestrado em Processo de Fabricação) – Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
7. SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica: estampagem**. 2ª ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 267p. p 121-129.
8. BLASS, A. **Estampagem**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Apostila. 1985.

9. SCHAEFFER, L. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 200p. p 121.
10. MESQUITA, E. L. A.; RUGANI, L. L. **Estampagem de Aços Inoxidáveis**. ACESITA. Apostila. 1997.
11. UFSC. **Departamento de Engenharia Mecânica- GRUCON**. Disponível em: <<http://construtor.cimm.com.br/cgi-win/construt.cgiconfiguradorresultado-1011>>. Acesso em 10 novembro de 2006.
12. J.KOPAC, Z. CAMPUS. **Incremental sheet metal forming on CNC-milling machine tool**. Journal of Materials Processing Technology 162-163, 2005, 622-628. University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia.
13. LAMMINEN, L. **Incremental sheet forming with an industrial robot - forming limits and their effect on component design**. Helsinki University of Technology. Finland. 2005.
14. KITAZAWA, K., WAKABAYASHI, A., MURATA, K., YAEJIMA, K. **Metal flow phenomena in computerized numerically controlled incremental stretch-expanding of aluminum sheets**. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 46, 1996, 267 p. p 65-70.
15. JESWIET, J.; HAGAN, E. e SZEKERES, A. **Proceedings of the institution of mechanical engineers part B- Journal of Engineering Manufacture**, 216, 2002, p. 1367-1371.
16. ALLWOOD, J. M.; HOUGHTON; N. E. e JACKSON. K. P. **The Design of an incremental sheet forming machine**. Institute for Manufacturing, University of Cambridge, Mill Lane, Cambridge CB2 1RX, United Kingdom. 2006.

17. LEACH, D.; GREEN, A. J. e BRAMLEY, A. N. **A new incremental sheet forming process for small batch and prototype parts.** 9th International Conference on Sheet Metal, Leuven, pp. 211-218, 2001.
18. J. JESWIET. **Asymmetric Incremental Sheet Forming.** Mechanical Engineering, Queen's University, Kingston, On, Canada K7L3N6. Advanced Materials Research Vols. 6-8 2005 pp. 35-38.
19. M. STRANO. **Incremental Forming Processes: Current and Potential Applications,** SME Technical Paper No MF03-114. 2003.
20. L.W.MEYER, C. GAHLERT AND F. HAHN. **Influence of an Incremental Deformation on Material Behaviour and Forming Limit of Aluminium AI99,5 and QT-Steel 42CrMo4.** Advanced Materials Research Vols. 6-8 2005 pp. 417-424.
21. LAMMINEN, L.; WADMAN, B et al. **Prototyping and Low Volume Production of Sheet Metal Components.** Research report. Disponível em: <www.nordicinnovation.net>. Acesso em: 17 julho de 2005.
22. TIBURI, F.; SHAEFFER, L. **Conceitos Principais da Estampagem Incremental.** In: 9º CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 26º SENAFOR. Porto Alegre, 2006. **ANAIS...** Porto Alegre: Metrópole 2006. v.1 270p. p245-258.
23. KIM T. J. & YANG D. Y. **Improvement of Formability for The Incremental Sheet Metal Forming Process.** International Journal of Mechanical Sciences 42, pp 1271-1286. 2000.
24. G. AMBROGIO, L. DE NAPOLI, L. FILICE, F. GAGLIARDI, M. MUZZAPPA, **Application of Incremental Forming Process for High Customized Medical Product Manufacturing** Department of Mechanical Engineering, University of Calabria, P. Bucci Bridge, 87036 Rende (CS), Italy. Journal of Materials Processing Technology 2005.

25. ALLWOOD, J.; JACKSON, K. **An Introduction to Incremental Sheet Forming in Cambridge**. CMI workshop on sandwich sheets, 21st June 2005.
26. REAGAN, J., SMITH, E. **Metal Spinning**, 1991, Lindsay Publications, Bradley, IL.
27. ISMAIL, N.; MAHDAVIAN, S. M., **Hydrodynamic Lubrication in Metal Spinning**. Tribology in Manufacturing Processes, vol. 5, pp. 119-123, 1994.
28. HIRT, G.; JUNK, S. e WITUSKI, N. **Surface quality, geometric precision and sheet thinning in incremental sheet forming**. In: Materials Week 2001. October 2001, Munich, Germany. Werkstoffwoche-Partnerschaft GBr.
29. J. R. DUFLOU; B. LAUWERS; J. VERBERT; Y. TUNCKOL, H. DE BAERDEMAEKER. **Achievable Accuracy in Single Point Incremental Forming: Case Studies**. Katholieke Universiteit Leuven – Department of Mechanical Engineering, Belgium. 2005. URL: www.mech.kuleuven.ac.be.
30. YAN, W., O'DOWD, N.P. AND BUSSO, E.P.: Numerical Study Of Sliding Wear Caused By a Loaded Pin on a Rotating Disc, Journal Of the Mechanics And Physics Of Solids 50. 2002. pp. 449-470.
31. [2] MURATA, Atsunobu. **Laboratório de Engenharia de Processo**, R&D Review of Toyota, Vol. 34, nº 3, 1999.
32. INFOMET. **Ligas Al-Mn**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/al>> Acesso em: 08 de dezembro de 2006.
33. HOSOMI, Y. **Basic Study on Forming Cranial Implants by Incremental Sheet Forming**. Keio University, School of Integrated Design Engineering, Center for Integrated Systems Engineering, Hideki Aoyama Laboratory, Yokohama, Kanagawa, Japan, 2005.

34. FATRONIK. **Incremental sheet forming - industrial applications**. International Seminar on Novel Sheet Metal Forming Technologies. Finland. 2006. Disponível em: www.fatronik.com/documentos/otraspub/NSF2006.pdf. Acesso em: 25 de setembro de 2006.
35. HIRT, G.; JUNK, S.; BAMBACH, M.; CHOUVALOVA, I.; AMES, J. **Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation**. Institute of Materials Technology / Precision Forming (LWP), Saarland University, Germany, 2005.
36. JESWIET, J. **Incremental Single Point Forming**. Department of Mechanical Engineering. Queen's University, Kingston, Ontario. jeswiet@me.queensu.ca. 2001.
37. J. R. DUFLOU; B. LAUWERS; J. VERBERT; Y. TUNCKOL, H. DE BAERDEMAEKER. **Achievable Accuracy in Single Point Incremental Forming: Case Studies**. Katholieke Universities Leuven – Department of Mechanical Engineering, Belgium. URL: www.mech.kuleuven.ac.be.2005.
38. ATTANASIO, E. CERETTI, C. GIARDINI. **Optimization of tool path in two points incremental forming**.Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, via Branze, 38, 25123 Brescia, Italy Università di Bergamo, Dipartimento di Progettazione e Tecnologie, viale Marconi, 5, 24044 Dalmine (BG), ItalyJournal of Materials Processing Technology 177 (2006) 409–412.
39. TABELA PERIÓDICA. Disponível em: <<http://www.tabelaperiodica.hpg.com.br/fe.htm>>. Acessado em: 20 de agosto de 2007.
40. ABAL. **Propriedades Mecânicas do Alumínio**. Disponível em: <http://www.abal.org.br/aluminio/propriedades_mecanicas.asp>. Acesso: 07 de agosto de 2007.
41. CURVAS DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO. Disponível em: <<http://www.cpgec.ufrgs.br/alex/Disciplinas/ENG01169>>. Acesso em: 23 de agosto de 2007.
42. SCHAEFFER, L. **Conformação dos Metais**. Ed. Rigel, Porto Alegre, 1995.

43. DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 2ª ed., 1981.
44. SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. Porto Alegre: Editora da UFRS, 1999.
45. SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. ed gard Blucher, 1974.
46. DUFLOU, J. R.; SZEKERES, A.; VANHERCK, P. **Force measures for single point incremental forming: an experimental study**. Katholieke Universiteit Leuven – Department of Mechanical Engineering, Belgium, 2005.

ANEXO 1: DISPOSITIVO PARA USINAGEM DE CORPO DE PROVA



ANEXO 2: FOTOS DAS FERRAMENTAS USADAS NOS TESTES PRÁTICOS

Ferramenta 1: Ferramenta de Aço ABNT 4340. Diâmetro 10 mm x 100 mm de comprimento.



Ferramenta 2: Fabricada em Metal duro (material usado para ferramenta de corte). Diâmetro 10 mm x 100 mm de comprimento.



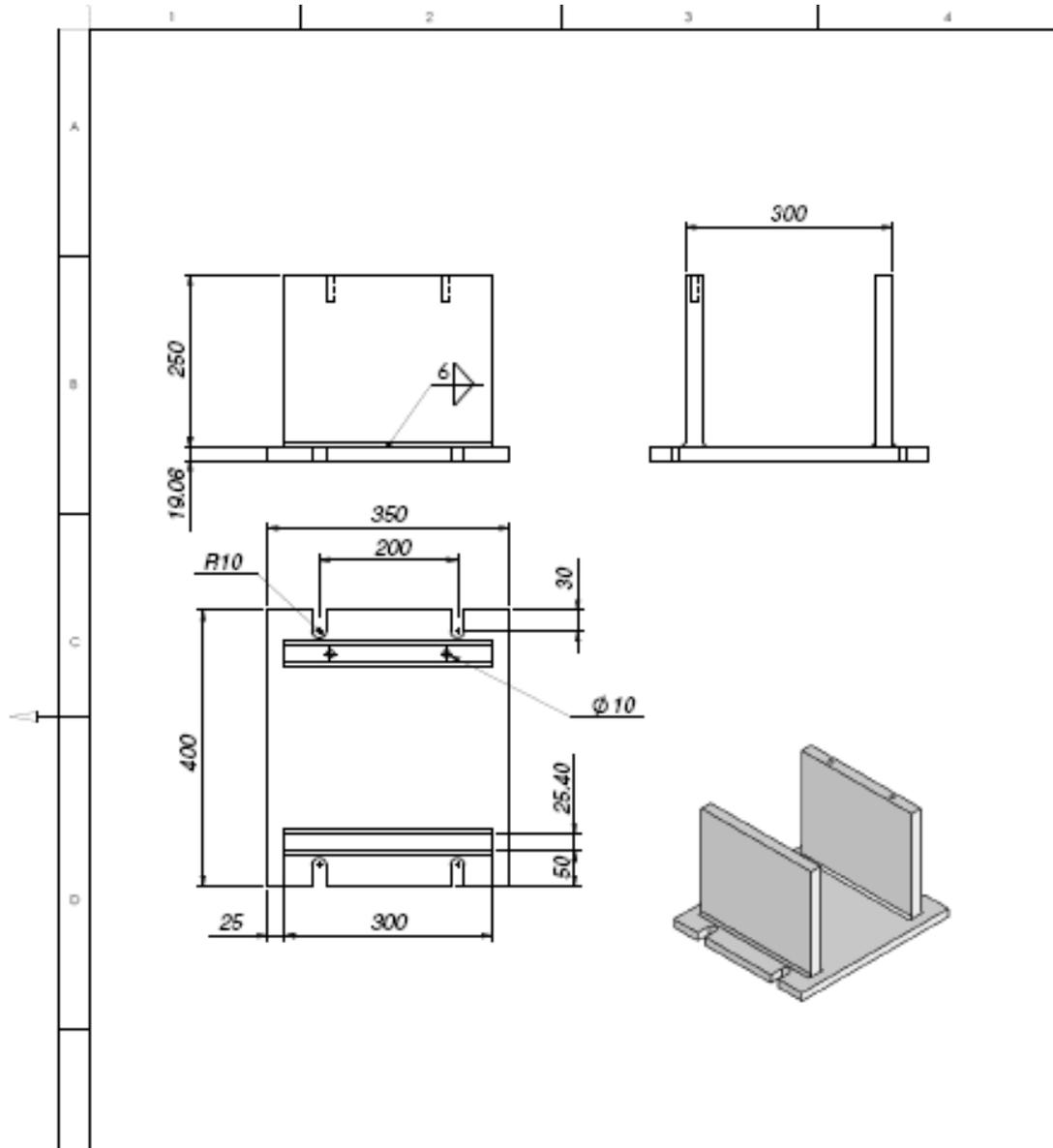
Ferramenta 3: Ferramenta de Aço ABNT 4340. Diâmetro 15 mm x 150 mm de comprimento.



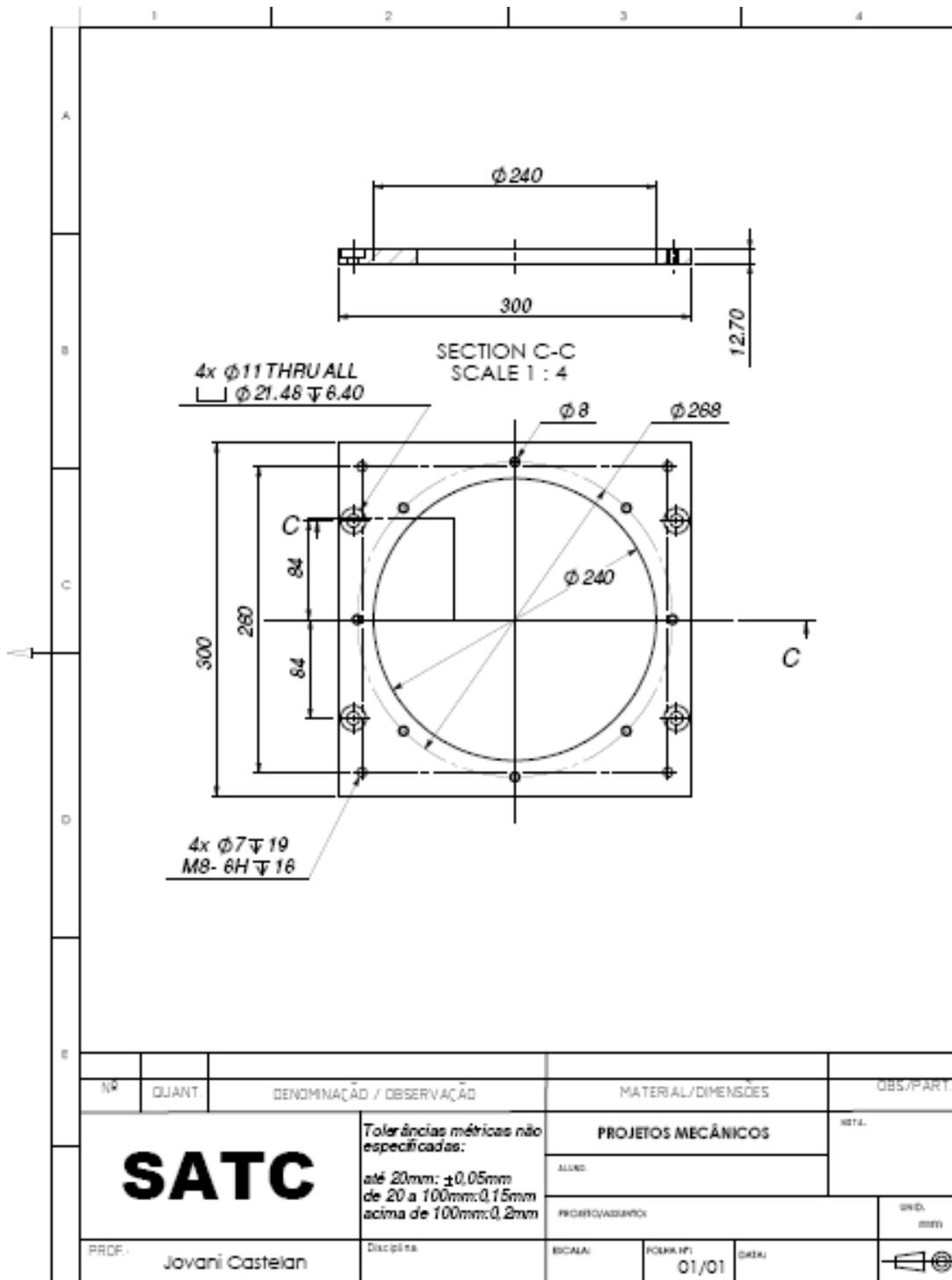
Ferramenta 4: Ferramenta de Aço ABNT 4340. Diâmetro 20 mm x 150 mm de comprimento.



ANEXO 3: PROJETO DO DISPOSITIVO PRENSA CHAPAS



QTD	QJANT.	DE NOMINAÇÃO / OBSERVAÇÃO	MATERIAL / DIMENSÕES	OBS./PART.	
SATC		Tolerâncias métricas não especificadas: até 20mm: ±0,05mm de 20 a 100mm: 0,15mm acima de 100mm: 0,2mm	PROJETOS MECÂNICOS ALUNO: _____ PROFESSOR(A): _____		META: _____ SWD. _____ (mm)



ANEXO 4: FERRAMENTAS MONTADAS NA MÁQUINA CNC

