

VICTOR HUGO DA SILVA BARROS

**FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS EM CHAPAS FINAS
DE ALUMÍNIO COMERCIALMENTE PURO USANDO O
MÉTODO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2019

VICTOR HUGO DA SILVA BARROS

**FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS EM CHAPAS FINAS DE
ALUMÍNIO COMERCIALMENTE PURO USANDO O MÉTODO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL**

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

Orientador: Wisley Falco Sales

UBERLÂNDIA

2019

VICTOR HUGO DA SILVA BARROS

**FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS EM CHAPAS FINAS DE ALUMÍNIO
COMERCIALMENTE PURO USANDO O MÉTODO DE ESTAMPAGEM
INCREMENTAL**

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

Uberlândia, 08 de Fevereiro de 2019

Banca de Avaliação:

Prof. Dr. Wisley Falco Sales
Orientador

Prof. Dr. Éder Silva Costa

Prof. M.Sc Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

UBERLÂNDIA

2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, e a minha família, meus pais Carlos e Verônica pelo suporte, incentivo e carinho. A minha irmã Danielle pelo companheirismo e minha namorada Thaynara pelo apoio e dedicação durante esses anos de graduação.

Ao Professor Wisley Falco Sales e ao doutorando Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, pela orientação, suporte, paciência e também pela oportunidade de desenvolver este trabalho. Aos demais membros do Laboratório de pesquisa e ensino em Usinagem (LEPU) meu agradecimento.

Aos meus amigos, Welington, William, Bruno José, Vinicius Vendramine, Lucas Mendes por todo convívio durante essa jornada.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento do alumínio comercialmente puro no processo de estampagem incremental. Foram feitos quatro testes, com a utilização de um centro de usinagem CNC, chapas de 0,5 mm de espessura de alumínio puro, suporte prensa-chapas, ferramenta de conformação com ponta semiesférica e fluido lubrificante. Foi avaliado nos testes como a chapa de alumínio puro respondia a variação da velocidade de avanço da máquina ferramenta. E também foi executado um teste sem a utilização de lubrificação afim de mensurar a importância desse parâmetro. Para avaliar os testes executados, foram realizados ensaios de tração, rugosidade e análise metalográfica nas chapas estampadas. Concluiu-se a importância da lubrificação no processo e o avanço como parâmetro essencial na estampagem incremental, devido as modificações geradas na peça através da variação dos mesmos.

Palavras chave: Estampagem incremental, Alumínio Comercialmente puro, Conformação.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the behavior of pure aluminum in the process of incremental sheet stamping. Four tests were performed, using a CNC machining center, 0.5 mm thick sheets of pure aluminum, press-plate support, a semi-spherical forming tool and lubricating fluid. It was evaluated in the tests as the pure aluminum plate responded to the variation of the speed of advance of the machine tool. In addition, a test was performed without the use of lubrication in order to measure the importance of this parameter. To evaluate the tests performed, tensile tests, roughness and metallographic analysis were performed on the stamped plates. It is concluded in the work, the importance of lubrication in the process, and the advance as a significant parameter in the incremental stamping, due to the changes generated in the part through the variation of the same ones.

Keywords: Incremental stamping, Pure Commercial Aluminum, Conformation.

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNC: Comando Numérico Computadorizado

SPIF: single point incremental forming

TPIF: two point incremental sheet forming

MSPIF: Multi-Pass single point incremental forming

CFC: Cúbico de face centrada

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Representação esquemática do processo de laminação, um exemplo de conformação mecânica.
- Figura 2.2 - Representação esquemática dos processos de conformação mecânica.
- Figura 2.3 - Representação esquemática de forjamento em matriz fechada.
- Figura 2.4 - Representação esquemática de forjamento em matriz fechada.
- Figura 2.5 - Representação esquemática do processo de laminação.
- Figura 2.6 - Representação esquemática do processo de trefilação.
- Figura 2.7 - Representação esquemática do processo de extrusão direta
- Figura 2.8 - Representação esquemática do processo de extrusão inversa
- Figura 2.9 - Representação esquemática do processo de estampagem profunda.
- Figura 2.10 - Representação esquemática do processo de estiramento.
- Figura 2.11 - Representação esquemática do processo de dobramento.
- Figura 2.12 - Representação esquemática do processo de corte.
- Figura 2.13 - Estampagem Incremental de Chapas
- Figura 2.14 - Representação Esquemática do Método SPIF
- Figura 2.15 - Representação Esquemática do Método TPIF
- Figura 2.16 - Ferramentas do processo de Estampagem Incremental com diferentes diâmetros
- Figura 2.17 - Lubrificação no processo de Estampagem Incremental
- Figura 2.18 - Centro de Usinagem CNC
- Figura 2.19 - Curva tensão x deformação teórico de engenharia.
- Figura 2.20 - Curva tensão x deformação para o Alumínio.
- Figura 3.1 - Centro de Usinagem CNC, ROMI DISCOVERY 760.
- Figura 3.2 - Suporte para fixação da chapa de alumínio puro no processo de estampagem incremental.
- Figura 3.3 - Ferramenta de ponta semiesférica fixada no mandril da máquina CNC.
- Figura 3.4 - Representação em 2D da geometria da peça a ser estampada.
- Figura 3.5 - lubrificante sobre a chapa de alumínio puro. 1- Filme de lubrificante sobre a chapa no início do processo. 2- Quantidade de lubrificante sobre a chapa no final do processo de estampagem.
- Figura 3.6 - Dimensões e geometria do corpo de prova para ensaio de tração. Fonte: Castelan,2007.

Figura 3.7 - Amostras de alumínio puro embutidas, lixadas, polidas e atacadas, antes da micrografia.

Figura 4.1 - Peça estampada após teste 1.

Figura 4.2 - Peça estampada após teste 2.

Figura 4.3 - Peça estampada após teste 3.

Figura 4.4 - Peça estampada após teste 4.1- Vista superior da peça.2 – Detalhe do acabamento superficial e da trinca gerada.

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

Figura 4.6 - Gráfico demonstrativo dos resultados para o parâmetro de rugosidade (Ra).

Figura 4.7 - Gráfico demonstrativo dos resultados para o parâmetro de rugosidade (Rq).

Figura 4.8 - Gráfico demonstrativo dos resultados para o parâmetro de rugosidade (Rt).

Figura 4.9 - Análise Metalográfica do alumínio não submetido ao processo de estampagem incremental.

Figura 4.10 - Análise Metalográfica do alumínio após o teste 1.

Figura 4.11 - Análise Metalográfica do alumínio após o teste 2.

Figura 4.12 - Análise Metalográfica do alumínio após o teste 3.

Figura 4.13 - Análise Metalográfica do alumínio após o teste 4.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros de testes de Estampagem Incremental.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do alumínio pelo ensaio de tração obtidas em 3 direções.

Tabela 4.2 - Valores teóricos para testes de tração em alumínio puro.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
CAPÍTULO II	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Conformação Mecânica	3
2.2 Classificações Quanto à Temperatura De Trabalho	4
2.3 Classificação Quanto ao Tipo de Esforço	4
2.4 Processos de Conformação	5
2.4.1 Forjamento	6
2.4.2 Laminação	7
2.4.3 Trefilação	8
2.4.4 Extrusão	9
2.4.5 Estampagem	11
2.5 Estampagem Incremental	14
2.5.1 Classificação do Processo de Estampagem	16
2.5.2 Parâmetros do Processo de Estampagem Incremental	18
2.6 Alumínio	21
2.6.1 Ligas de Alumínio	21
2.6.2 Propriedades Mecânicas	22
2.6.2.1 Limite de Resistência à tração	22
2.6.2.2 Limite de Escoamento	22
2.6.2.3 Alongamento	23
2.6.2.4 Propriedades do alumínio em alta e baixas temperaturas	23
2.6.2.5 Índice de Anisotropia	23

2.6.3 Estampabilidade do alumínio	24
CAPÍTULO III	25
METODOLOGIA.....	25
3.1 Centro de Usinagem CNC	25
3.2 Suporte Prensa-Chapas	26
3.3 Ferramenta de estampagem	26
3.4 Chapas de Alumínio Puro.....	27
3.5 Geometria da peça	27
3.6 Lubrificação.....	28
3.7 Procedimento Experimental	29
3.7.1 Ensaio de tração.....	29
3.7.2 Análise Metalográfica	29
3.7.3 Medição de rugosidade.....	30
3.7.4 Parâmetros dos Testes	31
CAPÍTULO IV.....	32
RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.2 Ensaio de Tração.....	32
4.2 Testes de Estampagem Incremental	33
4.3 Análise de Rugosidade	37
4.4 Análise Metalográfica.....	38
CAPÍTULO V	41
CONCLUSÃO.....	41
CAPÍTULO VI.....	42
REFERÊNCIAS	42

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A busca por novas tecnologias tem sido constante em empresas de diferentes áreas de produção, visando principalmente, o destaque no mercado, por meio de uma melhora nos produtos, redução dos custos com mão de obra, aumento da produção e diminuição dos desperdícios de materiais e riscos de falhas (DALEFFE, 2008).

A produção de produtos metálicos utilizando chapas é bastante diversificada necessitando vários processos produtivos, dentre eles, a estampagem. A estampagem incremental é uma evolução tecnológica bastante utilizada na produção de pequenas séries e protótipos, sendo capaz de minimizar o uso de matrizes (ferramentas dedicadas) na estampagem de chapas, com isso se diminui o custo de produtos (DALEFFE, 2008). Por se tratar de uma tecnologia relativamente recente, e ainda carecer de estudos para melhorias, eficácia e pela ampla área de atuação, o estudo da estampagem se torna altamente motivador.

Para este processo, são utilizadas ferramentas simples, de baixo custo, diferindo das tradicionais usadas em outros processos que possuem o mesmo objetivo. Entretanto, o tempo para realização do processo de estampagem incremental é lento, por esse motivo não é um processo recomendável para produção de grandes lotes (FRITZEN, 2012).

A aplicação do alumínio se dá pelas suas características mecânicas como de um material com modo de elasticidade baixo comparado aos aços, possui ótima resistência à corrosão, boa tenacidade, condutibilidade térmica, baixo peso específico tornando-o de grande importância e utilização em equipamentos de transporte ferroviário, rodoviário, aéreo e naval. Devido a sua alta ductilidade é um material de fácil laminação e forjamento, sendo utilizado em forma de chapas sem grandes problemas, além da sua vasta aplicação na indústria (CHIAVERINI, 1986).

No processo de estampagem incremental, o movimento da ferramenta é um dos fatores fundamentais na determinação da forma e tolerância final da peça acabada. A variação dos parâmetros operacionais da máquina CNC, como a velocidade de avanço, incremento em Z, rotação da ferramenta, geram efeitos na qualidade da peça estampada. Avaliar os efeitos provocados por essas variáveis nas peças de alumínio, são objetivos deste trabalho.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo o estudo do processo de estampagem incremental, por meio da produção de peças, utilizando chapas de 0,5 mm de alumínio puro, visando a avaliação da conformabilidade do material quando submetido a esse tipo de processo. No presente trabalho será avaliado também a influência da variação dos valores da velocidade de avanço da máquina CNC e da lubrificação e, evidenciado os efeitos causados pela alteração dessas variáveis nas peças conformadas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as peças produzidas e o desempenho do alumínio no processo.
- Avaliar a influência da velocidade de avanço na rugosidade superficial, no retorno elástico da peça conformada e investigar a interferência do avanço na microestrutura do alumínio.
- Avaliar a influência da lubrificação nas peças produzidas por estampagem incremental.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conformação Mecânica

Conformação mecânica é um processo de modificação de forma de um corpo metálico para outra forma definida (BRESCIANI, 2011), onde se aplica solicitações mecânicas no metal, que reagem a essa solicitação com mudanças na sua dimensão e também com alteração nas suas propriedades (HELMAN, 2010). As tensões ou solicitações aplicadas geralmente são inferiores ao limite de resistência à ruptura do material, ou seja, a forma final da peça não é obtida pela remoção de material, como na figura 2.1 que representa o processo de laminação, um exemplo de conformação mecânica. Salvo em casos onde é utilizada por exemplo o processo de conformação por usinagem, onde as tensões aplicadas são superiores ao limite de resistência, e, portanto, ocorre a remoção de material (BRESCIANI, 2011).

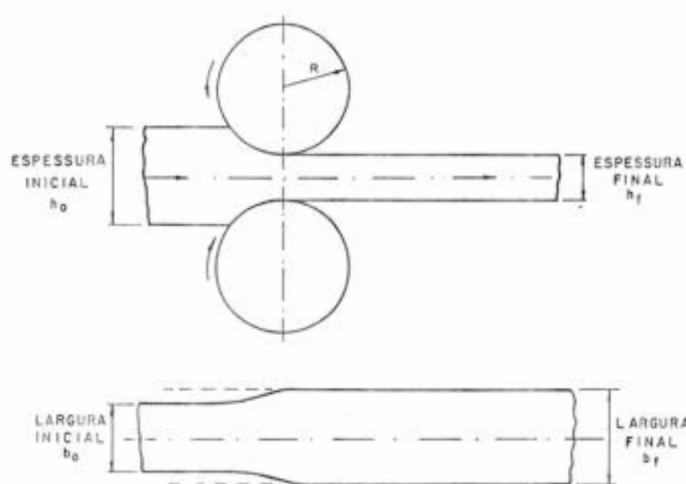


Figura 2.1 – Representação esquemática do processo de laminação, um exemplo de conformação mecânica. (Fonte: BRESCIANI, 2011)

A fabricação de peças, utilizando os processos de conformação mecânica, tem resumidamente como objetivo a obtenção de produtos com especificações de dimensão, forma, condições superficiais, e propriedades mecânicas, necessitando de baixos custos de fabricação com rápidas velocidades de produção (BRESCIANI, 2011).

A classificação dos processos de conformação pode ser feita de acordo com alguns critérios, como por exemplo, quanto à temperatura de trabalho utilizada e quanto ao tipo de esforço predominante (BRESCIANI, 2011).

2.2 Classificações Quanto à Temperatura De Trabalho

Em relação à temperatura de trabalho, os processos de deformação são classificados em trabalho à quente e trabalho à frio. Essa classificação é definida a partir da temperatura de recristalização, ou temperatura onde ocorre a formação de cristais. Se a temperatura de trabalho na conformação for maior que a temperatura de recristalização o processo é denominado de trabalho a quente, caso contrário, é denominado trabalho a frio (CHIAVERINI, 1986).

A utilização do processo de trabalho à quente possibilita o emprego de menor esforço mecânico, o material melhora sua capacidade de receber impacto (tenacidade), devido ao refinamento da estrutura e a eliminação da porosidade, o trabalho a quente melhora a capacidade de se deformar mais profundamente, no entanto piora a obtenção de tolerâncias estreitas. É necessário para esse tipo de trabalho ferramentas que possuem alta resistência à temperatura, aumentando assim o custo do processo (CHIAVERINI, 1986). A utilização do processo de trabalho à frio, melhora a resistência mecânica do material e aumenta sua dureza, consegue melhor acabamento superficial e obtêm tolerâncias mais estreitas em relação ao trabalho a quente. Mas exige um maior esforço mecânico do maquinário utilizado (CHIAVERINI, 1986).

2.3 Classificação Quanto ao Tipo de Esforço

Segundo Bresciani (2011), em função dos tipos de esforços ou forças aplicadas no material utilizado, a conformação mecânica se divide nas seguintes categorias:

Compressão direta

- Compressão indireta;
- Tração;
- Dobramento;
- Cisalhamento;

O processo de conformação mecânica por compressão direta consiste na aplicação de compressão na superfície da peça fazendo o material deformar-se em relação à direção da compressão. Tem-se como exemplos desse processo, o forjamento e a laminação (CHIAVERINI, 1986).

No processo de conformação mecânica por compressão indireta, ocorre geralmente quando uma força de tração ou compressão é aplicada e surgem reações da peça com a matriz, fazendo com que o metal flua sobre a ação de intensas forças de compressão. Tem-se como exemplo o processo de trefilação, extrusão e estampagem profunda (CHIAVERINI, 1986).

No processo de conformação por tração, a peça metálica é tracionada em ambas as direções, contra uma matriz ou punção fazendo-o definir o contorno da peça. O principal exemplo desse processo é o estiramento. No processo de conformação por dobramento, a peça é sujeita a movimentos de dobramento, de modo a adquirir um determinado contorno. No processo de cisalhamento é feita a ruptura ou corte da peça no plano de cisalhamento, através de esforços na qual é submetida a peça (CHIAVERINI, 1914).

2.4 Processos de Conformação

Dentre os principais processos da conformação mecânica, se destacam o forjamento, a laminação, a trefilação, a extrusão e a estampagem, na figura 2.2 temos a representação esquemática dos principais processos de conformação.

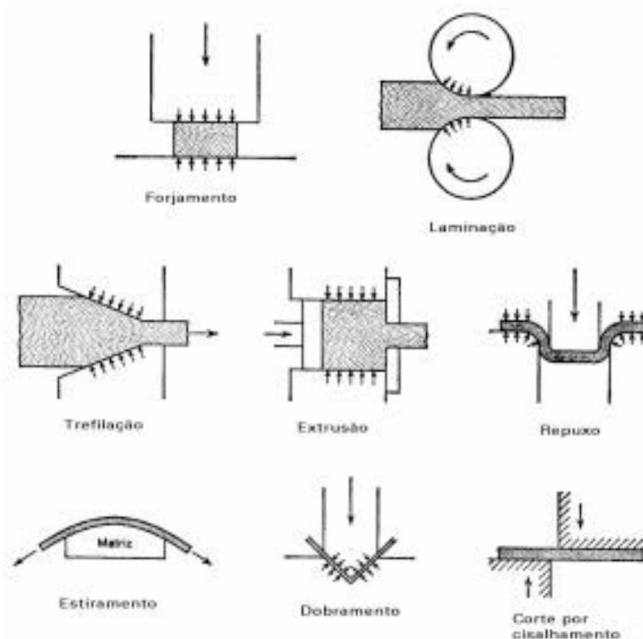


*Figura 2.2 -Representação esquemática dos processos de conformação mecânica.
Fonte: CHIAVERINI, 1986)*

2.4.1 Forjamento

O forjamento é um processo de conformação mecânica que utiliza uma aplicação gradativa de pressão e também o martelamento (golpes rápidos e sucessivos no metal) para se obter a geometria desejada no projeto. Em relação a classificação por temperatura, esse processo é realizado normalmente à quente (CHIAVERINI, 1986).

Os principais equipamentos no processo de forjamento são os martelos e as prensas. Os martelos causam a deformação da peça através do impacto, fazendo com que a pressão máxima seja obtida no momento do choque. No caso das prensas, elas aplicam no material uma força de compressão gradativa e lenta, sendo assim, o maior valor de pressão obtido é no final do processo. O processo de prensagem é mais regular que o processo de martelamento, sendo o último um processo de deformação mais superficial, enquanto o outro atinge camadas mais profundas na peça (CHIAVERINI, 1986).

O forjamento se divide em duas categorias em relação a matriz utilizada: o forjamento livre ou forjamento em matriz aberta e o forjamento em matriz fechada (ROCHA, 2012). No forjamento em matriz aberta o processo é realizado entre ferramentas planas e o escoamento do material acontece em sentido perpendicular à direção em que a força é aplicada, processo representado pela figura 2.3. Esse processo tem a vantagem de não ser necessário a confecção de matrizes com preços elevados, mas se restringe a pequenos lotes. É geralmente um processo antecessor ao processo de matriz fechada (BRESCIANI, 2011).

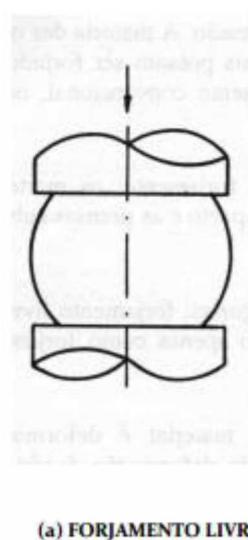
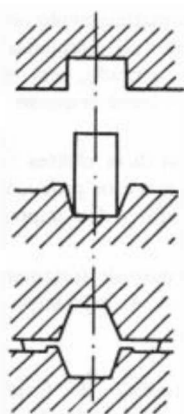


Figura 2.3- Representação esquemática de forjamento livre.

(Fonte: BRESCIANI, 2011)

No forjamento em matriz fechada o processo ocorre entre duas metades de matrizes, a forma final da peça desejada é definida previamente pela forma das duas matrizes utilizadas. Com isso possui ampla restrição no escoamento do material, fazendo com que o processo ocorra sob alta pressão, pois a deformação acontece em uma cavidade fechada. É necessário no momento da fabricação preencher completamente o volume entre as duas matrizes com o material a ser forjado. Sendo costumeiro trabalho com um pequeno excesso de material, e após o forjamento é necessário a reparação de rebarbas que restaram no processo, representado pela figura 2.4. Esse processo possui a vantagem de conseguir obter tolerâncias mais estreitas em relação ao processo de forjamento livre. Por isso, possui um custo elevado (BRESCIANI, 2011).



(b) FORJAMENTO EM MATRIZ

Figura 2.4- Representação esquemática de forjamento em matriz fechada.

(Fonte: BRESCIANI, 2011)

2.4.2 Laminação

A laminação é um processo de conformação mecânica que utiliza essencialmente dois cilindros, sendo esses as ferramentas do processo, que giram ambos à mesma velocidade e normalmente em sentido oposto. É introduzido entre os cilindros um corpo sólido ou peça, que ao passar entre os cilindros sofre uma deformação plástica, reduzindo sua superfície lateral ou transversal, e consequentemente aumentando sua largura e comprimento, processo representado pela figura 2.5. Em condições normais do processo, a redução da espessura gera o alongamento da peça, enquanto que o alargamento produzido não é suficientemente grande, sendo em alguns casos desprezado. Afim de se obter uma determinada espessura, as peças podem necessitar de sucessivos passes entre os cilindros, e consequentemente em cada passe deve-se diminuir a distância entre eles (BRESCIANI, 2011).

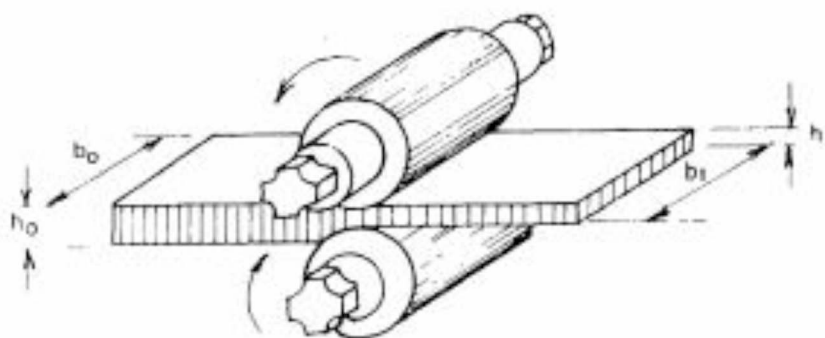


*Figura 2.5- Representação esquemática do processo de laminação.
(Fonte: CHIAVERINI, 1986)*

A atuação da força de atrito entre os cilindros e a peça é responsável pela passagem da peça pelo laminador. Sendo essa força de atrito, proporcional à força normal obtida na superfície de contato. A pressão de contato é obtida através da divisão da força normal pela área da superfície de contato (CHIAVERINI, 1986).

Em relação as condições de trabalho, o processo de laminação pode ser realizado à frio ou à quente, sendo as dimensões e a estrutura do material a ser laminado a característica para definir a temperatura do processo (CHIAVERINI, 1986).

A laminação à quente, é comumente aplicada onde se deve reduzir drasticamente as secções transversais da peça, utilizada em operações iniciais como de desbaste. O processo ocorre acima da temperatura de recristalização do material da peça, pois com isso se reduz a resistência a deformação plástica do metal, facilitando a laminação. A peça inicial é geralmente lingotes fundidos ou tarugos, derivados do processo de lingotamento (CHIAVERINI, 1986). No processo de laminação à frio, a resistência à deformação plástica é maior, pois atua abaixo da temperatura de recristalização do metal, com isso não se consegue reduzir grandes secções transversais da peça. Portanto, a laminação à frio é geralmente aplicada a processos finais ou de acabamento. No processamento, a peça inicial é um produto semiacabado, ou anteriormente laminado à quente (CHIAVERINI, 1986; BRESCIANI, 2011).

2.4.3 Trefilação

Na trefilação, o processo de conformação plástica é realizado através de uma ferramenta denominada fieira, que externamente tem formato cilíndrico e possui um furo em seu centro por onde é passado um fio, barra ou tubo com o material desejado. O diâmetro do furo contido na fieira é decrescente, apresentando um perfil cônico em forma de funil. É utilizado como

matéria prima do processo um material em forma de arame, barra ou tubo, que são geralmente obtidos através da laminação e extrusão. Processo representado pela figura 2.6. (ROCHA, 2012).

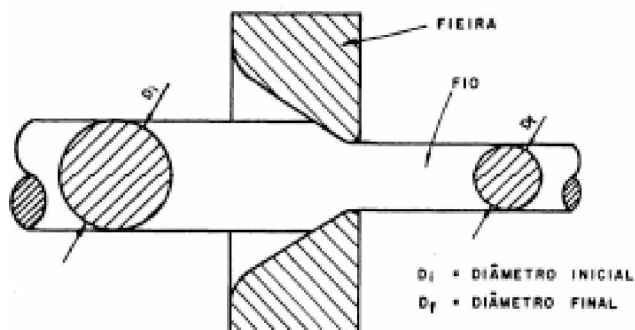


*Figura 2.6 – Representação esquemática do processo de trefilação.
(Fonte: BRESCIANI, 2011)*

A passagem do fio através da fieira ocasiona a redução da sua secção, ou seja, o material deforma-se conforme atravessa a fieira, reduzindo assim seu diâmetro. Como resultado final do processo obtém-se um produto com menor diâmetro e comprimento maior, obtendo ótimo controle dimensional. Os esforços exercidos pela fieira são de compressão, ocasionados pelo contato entre o fio e as paredes do furo da fieira. Após a passagem do fio, ocorre um esforço de tração que possui origem externa e é aplicado na direção axial do material. Como o processo apresenta dois tipos de esforços, sendo o interno e causador da deformação, de compressão, e o externo de tração, a trefilação é classificada como um processo de compressão indireta (ROCHA, 2012).

O processo de trefilação em relação à temperatura de trabalho é normalmente um trabalho realizado à frio, apesar de não eliminar o encruamento, que ocasiona a diminuição da ductilidade do material e aumento de sua resistência mecânica. O objetivo do processo é obter fios, barras ou tubos com menores diâmetros, com controle dimensional e propriedades mecânicas controladas. Geralmente após se realizar sucessivas passagens do material pelo processo, é necessário realizar um recozimento, que é um tratamento térmico afim de conferir a ductilidade do material perdida através do encruamento, para enfim atender as características mecânicas exigidas no projeto (BRESCIANI, 2011).

2.4.4 Extrusão

Sendo um processo de conformação plástica, a extrusão consiste, em essência, em forçar a passagem de um bloco ou tarugo de metal através de um orifício de uma ferramenta ou matriz,

através da aplicação de elevadas pressões por meio da compressão de um pistão que é acionado hidráulica ou pneumaticamente. Ocasionalmente assim a redução da secção transversal do bloco ou tarugo (HELMAN, 2010).

O processo de extrusão é geralmente realizado à quente, devido ao elevado esforço necessário para ocorrer a deformação da peça, a passagem do tarugo através de um furo de secção menor (ferramenta), provoca a deformação plástica do tarugo, mas sem ocorrer o encruamento, devido à alta temperatura de trabalho (BRESCIANI, 2011).

O processo geralmente produz como peça final barras cilíndricas ou tubos, mas também pode ser obtida peças com secções de formas complexas, quando se utiliza um material como o alumínio que é facilmente extrudável. Para esses materiais pode-se obter peças com formas finas e bom acabamento superficial (HELMAN, 2010).

Existem dois tipos de extrusão: direta e inversa. Na extrusão direta o tarugo a ser processado é colocado em um cilindro ou câmara e este é empurrado contra a ferramenta, forçando-o através do orifício ou matriz por um pistão ou êmbolo, como demonstra a figura 2.7. (HELMAN, 2010).

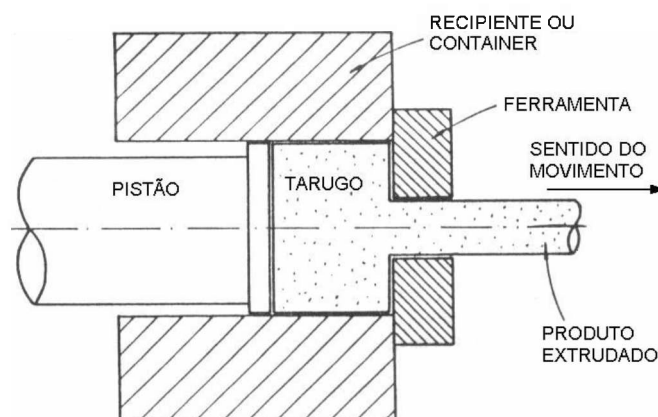


*Figura 2.7 – Representação esquemática do processo de extrusão direta.
(Fonte: BRESCIANI, 2011)*

Na extrusão inversa, o pistão é tubular e ele é preso a matriz. A outra extremidade da câmara é fechada por uma placa de apoio. O processo é classificado como indireto pois a deformação da peça ocorre através das paredes internas da ferramenta, onde o pistão se mantém fixo, e a ferramenta ou matriz é localizada na sua extremidade, assim o recipiente contendo o tarugo avança em direção a ferramenta, demonstrado na figura 2.8. Tornando assim o atrito entre o recipiente e o tarugo inexistente. Nesse processo o esforço necessário para a deformação é menor. (ROCHA, 2012).

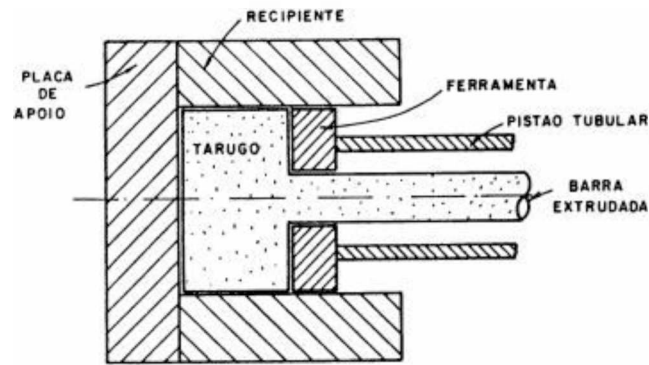


*Figura 2.8 – Representação esquemática do processo de extrusão inversa.
(Fonte: BRESCIANI, 2011)*

2.4.5 Estampagem

O método de estampagem é um processo de conformação mecânica, que pode ser realizado à quente ou à frio, mas que geralmente ocorre à frio, esse processo produz alterações na forma geométrica de determinada chapa plana através de um conjunto de operações feitos por prensas de estampagem, com o auxílio de matrizes ou estampo (CHIAVERINI, 1986).

A palavra estampagem define várias operações realizadas em chapas de metal, sempre ocorrendo mudanças na forma geométrica dessas chapas como por exemplo cavidades, dobras, saliências, furos e cunhas. Todas essas mudanças de forma são realizadas através de deformação plástica, com escoamento do material, com isso nesse processo tem-se pouco desperdício de matéria (FRITZEN, 2012).

O processo de estampagem se divide nas seguintes operações:

- Embutimento ou estampagem profunda;
- Estiramento e dobramento;
- Corte;

Dentre esses processos tanto o estiramento e dobramento como o corte são realizados à frio, o embutimento pode ser realizado à quente, isso depende da profundidade de deformação exigida (CHIAVERINI, 1986).

2.4.5.1 Estampagem: Processo de Embutimento

É um processo de estampagem em que uma chapa inicialmente plana é conformada e transformada em uma peça com formato de copo oco (CHIAVERINI, 1986). A peça é produzida sem que haja modificação da sua espessura, além de aparecimento de rugas e trincas.

(FRITZEN, 2012). Pode-se obter copos com diferentes diâmetros, com fundos esféricos ou planos e ainda com paredes laterais inclinadas (ROCHA, 2012).

As ferramentas utilizadas no processo são denominadas de estampos. Os estampos são formados por uma matriz, um punção e um sujeitador. A estampagem ocorre através da aplicação de uma força exercida pelo punção sobre a chapa, forçando-a a penetrar na matriz, como na figura 2.9 abaixo. Esse processo tem como aplicação a fabricação de peças como painéis, portas de carro, cápsulas, para-lamas de automóveis, etc (FRITZEN, 2012).

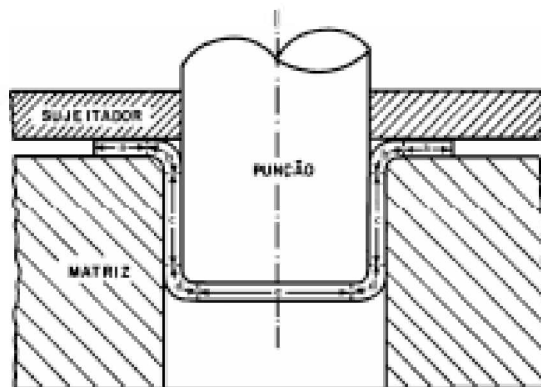


*Figura 2.9 – Representação esquemática do processo de estampagem profunda.
(Fonte: BRESCIANI, 2011)*

2.4.5.2 Estampagem: Processo de Estiramento

No processo de conformação de chapas por estiramento, a operação consiste em aplicar forças de tração de modo a esticar a peça estampada, ao longo de uma ferramenta ou matriz definindo assim o contorno da peça, demonstrado na figura 2.10. Devido ao gradiente de tensões ser pequeno, e da atuação da força trativa, o efeito do retorno elástico é quase totalmente eliminado. No processo de estiramento pode ser obtido grandes deformações apenas em materiais com boa ductilidade, devido ao efeito das tensões trativas ou de tração (FRITZEN, 2012).

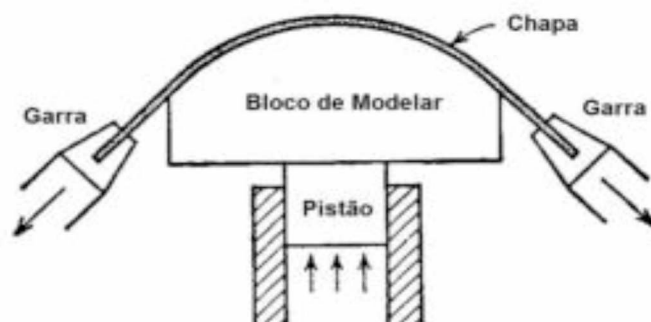


*Figura 2.10 – Representação esquemática do processo de estiramento.
(Fonte: DIETER E BACON, 1988).*

O estiramento é muito utilizado na produção de peças para indústria automobilística, principalmente utilizando materiais como alumínio, aço, níquel e titânio para a produção de peças aeroespaciais como chapas da fuselagem e cabine dos aviões. Dentre os benefícios das peças produzidas por estiramento tem-se o aumento da dureza da peça, o aumento da resistência a tração e a dificuldade de se aparecer rugas ou fivelas na peça estirada. Como restrições do processo pode-se destacar a lentidão do processo em alguns casos, comparando com a estampagem convencional, além da dificuldade de se estirar materiais com baixa ductilidade, e a capacidade limitada de se formar determinados ângulos nas peças (FRITZEN, 2012).

2.4.5.3 Estampagem: Processo de Dobramento

No processo de dobramento são utilizadas ferramentas denominadas estampos de dobra, que são basicamente um punção e uma matriz. No processo ocorre a aplicação de esforços para provocar a deformação plástica, mudando a forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes, em determinado ângulo, representação na figura 2.11 abaixo. Pode-se fabricar através do dobramento desde peças simples até peças complexas com bordas, flanges, corrugação e emendas, utilizadas na indústria naval e automobilística (FRITZEN, 2012).

No processo é importante evitar a presença de cantos vivos para que não ocorram pontos concentradores de tensão na chapa. É recomendado fixar os raios de curvatura dependendo da dureza do material, para materiais mais dúcteis os raios são de 1 a 2 vezes a espessura da chapa, já para materiais mais duros esses raios chegam a 4 vezes a espessura. Devido ao retorno elástico dos materiais mais duros, é necessário a construção de matrizes com maiores ângulos de dobramento, e a utilização de várias etapas para obter as requisições de projeto. Além do retorno elástico, pode-se ocorrer outros problemas no processo como variações na espessura e na secção que são fenômenos indesejáveis de projeto (CHIAVERINI, 1986).

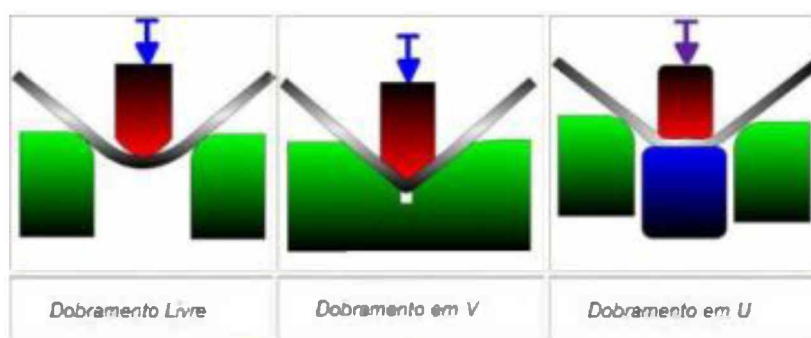


*Figura 2.11 – Representação esquemática do processo de dobramento.
(Fonte: MARCONDES, 2009)*

2.4.5.4 Estampagem: Processo de Corte

O processo de corte, é submetido devido a ação de uma ferramenta ou punção de corte, a chapa que vai ser cortada é apoiada em uma matriz, e o punção através de uma prensa aplica uma força de compressão sobre a chapa, que se transforma em uma força cisalhante, provocando a ruptura de uma porção da chapa. O material é deformado plasticamente até sua ruptura, como na figura 2.12. Uma regra definida experimentalmente, é que para se cortar chapas de aço, é necessário que o diâmetro do punção seja igual ou menor que a espessura da chapa. É importante definir no processo, o valor da folga, que é o espaço entre os cantos afiados da ferramenta. Esse valor varia dependendo do material da chapa e da sua espessura, além disso é necessário o conhecimento de outros fatores para definir o valor da folga, como o valor da força máxima de corte. É estabelecido que quanto menor a espessura da chapa e o diâmetro do punção, menor deverá ser a folga (CHIAVERINI, 1986).

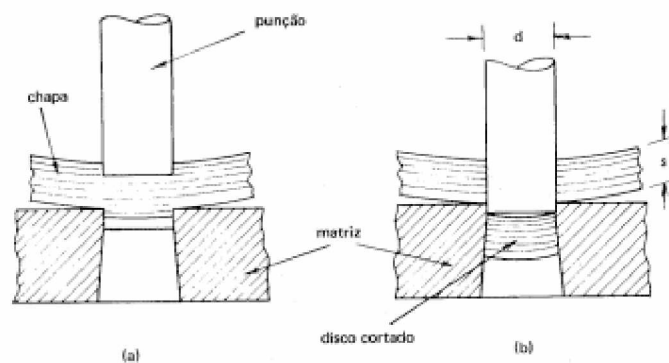


*Figura 2.12 – Representação esquemática do processo de corte.
(Fonte: CHIAVERINI, 1986)*

2.5 Estampagem Incremental

A estampagem incremental é uma evolução tecnológica bastante utilizada na produção de pequenas séries e protótipos, sendo capaz de minimizar o uso de matrizes (ferramentas dedicadas) e até a não utilização das mesmas na estampagem de chapas, com isso se diminui o custo de produtos (DALEFFE, 2008). Por se tratar de uma tecnologia relativamente recente, e ainda carecer de estudos para melhorias, eficácia e pela ampla área de atuação, o estudo da estampagem se torna altamente motivador.

A produção de produtos metálicos utilizando chapas é bastante diversificada necessitando vários processos produtivos, dentre eles, a estampagem. O campo de aplicação da estampagem incremental é amplo e está presente na indústria automobilística, na indústria

aeroespacial, aeronáutica, na indústria de produtos domésticos e outros produtos industrializados (FRITZEN, 2012).

Como principais vantagens do processo podem-se destacar o baixo custo ferramental utilizado em relação a outros processos de estampagem, a minimização do uso de matrizes e como no caso da estampagem de ponto simples (*single point incremental forming*), SPIF, a não utilização dessas ferramentas dedicadas. É viável a utilização do processo na fabricação de pequenos lotes, na prototipagem, peças para reposição, e ainda é um processo benéfico para o meio ambiente pela baixa energia utilizada e por baixos ruídos, além do reduzido desperdício de material (TIBURI, 2007).

Na estampagem incremental de chapas, a peça inicial, chapa ou blank, geralmente retangular e com espessura variando entre 0,5 e 1,5 mm é presa através de suportes ou elementos de fixação, em um dispositivo que se movimenta na direção vertical de uma máquina CNC (comando numérico computadorizado). No eixo árvore da máquina CNC é acoplada a ferramenta própria para o processo de estampagem podendo ser rotativa ou não, geralmente com ponta esférica, semiesférica ou abaloada, essa ferramenta desliza sobre a chapa e através de incrementos gradativos na direção vertical (eixo z) conforma a chapa (CASTELAN, 2007). O processo é gradativo para não romper a chapa. A ferramenta se movimenta nos três eixos do plano 3D, onde é definido o eixo X com movimento na direção longitudinal, o eixo Y como movimento na direção transversal e eixo Z movimenta na direção vertical, eixo da profundidade, processo representado na figura 2.13 (LACERDA, 2016).

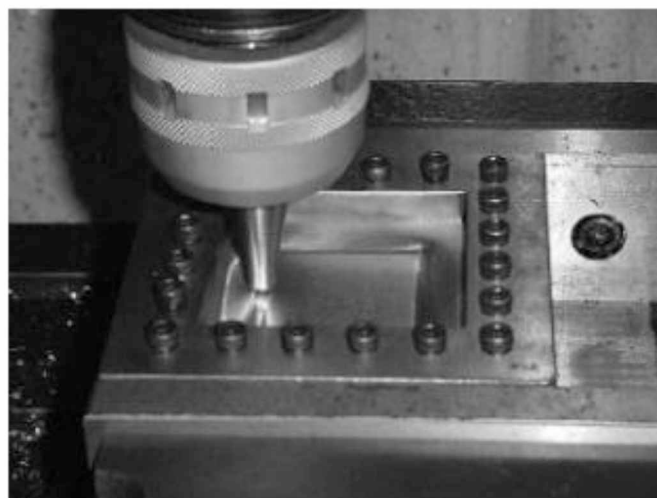


Figura 2.13 – Estampagem Incremental de Chapas.

(Fonte: KIM et al, 2002)

2.5.1 Classificação do Processo de Estampagem

A estampagem incremental pode se classificar de acordo com o tipo de ferramenta, pela quantidade de pontos de apoio da chapa, pela geometria da peça, etc. Em relação ao tipo de ferramenta, existem processos que utilizam matrizes e estas definem a forma final da peça, processos que possuem ferramentas simples que executam movimentos de rotação e translação, e também ferramentas estacionárias que ficam posicionadas sob a chapa utilizada (CASTELAN, 2007). Como classificação mais usual para o processo, em relação ao número de pontos de apoio da chapa, temos dois grupos principais:

- Estampagem Incremental de ponto simples (SPIF)
- Estampagem Incremental de dois pontos (TPIF)

O SPIF (estampagem incremental com ponto simples), utiliza ferramentas que fazem movimentos de translação e rotação, e não utilizam matrizes, a chapa é pressionada em apenas um ponto, o ponto onde acontece a deformação plástica é exatamente no ponto de contato da ferramenta. Esse processo é chamado de conformação incremental negativa, pois à medida que a chapa plana é deformada, forma-se uma cavidade na chapa pelo deslocamento da ferramenta, como representado na figura 2.14. É um dos processos de estampagem mais simples pois não é necessário a utilização de suportes de apoio, mas também gera muitas diferenças entre o modelo estampado com o modelo implementado na máquina (LOPES, 2013).

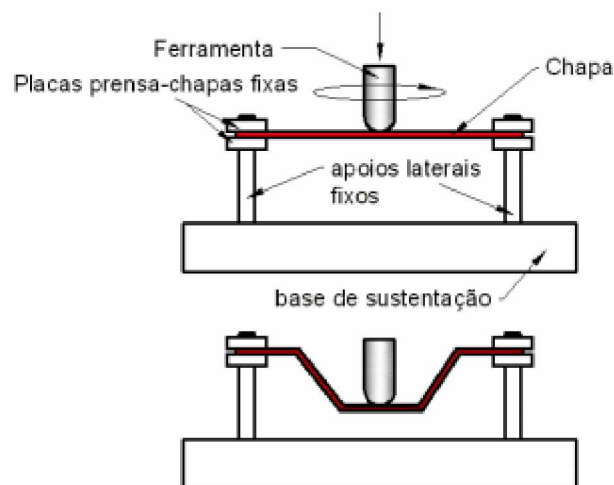


*Figura 2.14 – Representação Esquemática do Método SPIF
(Fonte: CASTELAN, 2010)*

No TPIF (estampagem incremental de dois pontos), é introduzido no sistema uma matriz parcial ou total, no caso da matriz parcial esta não possui uma forma ou geometria específica,

podendo criar um número maior de peças conformadas. No caso de matrizes totais não se tem essa flexibilidade de peças produzidas, além de ser um processo mais caro, pois a construção dessas matrizes depende de materiais e processos de fabricação diversos. Essas matrizes parciais ou totais são colocadas no centro da chapa estampada, como um apoio estático. O processo apresenta dois pontos onde fornecem pressão na chapa ao mesmo tempo, um ponto de pressão é exercido pela ferramenta tal como no SPIF, onde a ferramenta pressiona a chapa para baixo, causando a deformação plástica, e tem-se o segundo ponto de pressão que é exercido pela ação da matriz parcial ou total, que fornece uma força contrária à força exercida pela ferramenta, ou seja, uma força para cima, como representado na figura 2.15. O processo é chamado de conformação incremental positiva, pois produz peças com elevações em relação a parte plana da chapa, mas também pode-se produzir peças de conformação negativa, dependendo da forma da matriz utilizada (LOPES, 2013).

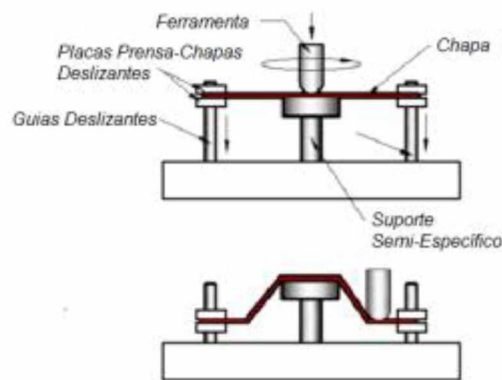


*Figura 2.15 – Representação Esquemática do Método TPIF
(Fonte: CASTELAN, 2010)*

Na fabricação de peças com geometrias mais complexas o TPIF consegue uma maior gama de produtos, além de se obter melhores tolerâncias dimensionais devido ao retorno elástico ser menor do que comparado ao processo de SPIF, mas devido a utilização de matrizes parciais ou totais se torna um processo mais caro.

Para se diminuir as limitações de produção de peças no processo SPIF, se utiliza a Estampagem Incremental em Múltiplos Passes (MSPIF), com esse processo pode-se abranger uma maior variedade de peças produzidas na estampagem, devido ao aumento dos limites de angulações e do ângulo de parede (Ψ). O ângulo de parede é definido pela relação entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação. O aumento do ângulo de parede ocasiona o encruamento no material, aumentando assim a rigidez da chapa, tornando-a mais tenaz e resistente a deformação, prolongando o limite de ruptura. No processo de MSPIF, se realiza

passes de estampagem intermediários, para se incrementar o ângulo de parede (Ψ), e se obter as vantagens que esse aumento ocasiona (FRITZEN, 2012).

2.5.2 Parâmetros do Processo de Estampagem Incremental

Os parâmetros mais importantes e essenciais na execução do processo de estampagem incremental estão relacionados basicamente com a ferramenta (tamanho, forma e material), além da sua velocidade de avanço, a chapa utilizada (espessura e propriedades mecânicas), as características da máquina CNC, os valores de movimentação dos eixos X, Y, Z da máquina, o lubrificante utilizado e a temperatura e forças exigidas no processo (DALEFFE, 2008). Alguns dos parâmetros citados serão detalhados a seguir:

2.5.2.1 Ferramentas de Estampagem Incremental

A escolha da ferramenta de trabalho interfere em fatores importantes do produto final, como no acabamento superficial da peça produzida, nas limitações de geometria da peça e no tempo de estampagem. Na escolha da ferramenta é necessário definir seu diâmetro, forma e o seu material (CASTELAN, 2007).

O raio de ponta da ferramenta sendo um dos parâmetros a ser definido, varia de valores pequenos em torno de 6 mm até valores grandes por volta de 100 mm dependendo da aplicação. Geralmente o diâmetro escolhido baseia-se no menor raio presente na peça a ser produzida. Mas é necessário perceber que diâmetros pequenos além de levar maior tempo na fabricação, pois é necessário um maior número de passos na peça, ainda deixa maiores quantidades de marcas na peça. Em relação a escolha de diâmetros grandes, pode-se obter um melhor acabamento superficial, menor tempo de estampagem, mas pior será a precisão dimensional e maiores forças serão utilizadas no processo (LOPES, 2013).

A ferramenta tem sua cabeça hemisférica com determinado raio de ponta, a ponta da ferramenta geralmente abaloada ajuda no contato mais suave com a peça. Os materiais utilizados na produção da ferramenta precisam suportar altas forças de atrito, e na maioria dos casos são feitas com aço ferramenta, as vezes revestidas sua camada superficial com metal duro para se diminuir o atrito, aumentar a resistência ao desgaste e a resistência a fadiga, seguem exemplos de ferramentas de estampagem incremental na imagem 2.16 (LOPES, 2013).



Figura 2.16 – Ferramentas do processo de Estampagem Incremental com diferentes diâmetros. (Fonte: HIRT, 2004)

2.5.2.2 Lubrificação

A utilização da lubrificação no processo, interfere em fatores como desgaste da ferramenta, rugosidade superficial da peça, diminuição da temperatura da ferramenta e chapa durante o processo, diminuição do atrito, redução da vibração, diminuição de ruídos (LACERDA, 2016; CASTELAN, 2007).

Os lubrificantes mais utilizados no processo de estampagem incremental são o sebo de velas, sebo misturado com óleo e sabão misturado com óleo, além de graxas a base de lítio, a imagem 2.17 abaixo mostra um exemplo de lubrificação no processo de estampagem incremental (LACERDA, 2016; DALEFFE, 2008).



Figura 2.17 – Lubrificação no processo de Estampagem Incremental (Fonte: CASTELAN, 2010)

2.5.2.3 Máquinas para estampagem incremental de chapas

Existem máquinas projetadas especialmente para o processo de estampagem incremental, mas na maioria dos processos utiliza-se máquinas de três eixos com controle CNC.

Essas máquinas podem ser usadas para outros processos de usinagem, como o fresamento por exemplo. Elas são atrativas devido ao baixo custo de início de operação, existem grandes variedades de máquinas CNC no mercado, com diferentes capacidades volumétricas, rigidez, carga máxima, velocidade e preços. As principais características que essas máquinas precisam ter para executar o processo de estampagem são altas velocidades, boa capacidade volumétrica e boa rigidez. Como desvantagens de se utilizar uma máquina não dedicada ao processo de estampagem pode-se destacar o carregamento suportado no eixo árvore, que relativamente não é alto, podendo danificar a máquina dependendo do carregamento utilizado, a imagem 2.18 mostra um exemplo de máquina CNC (DALEFFE, 2008), (LOPES, 2013).



*Figura 2.18 – Centro de Usinagem CNC
(Fonte: HIRT, 2004)*

2.5.2.4 Velocidade de Avanço

Importante fator no processo, tem influência sobre a conformabilidade, o atrito entre a ferramenta e a chapa e sobre o tempo de estampagem. Pode-se verificar através da literatura que quanto menor a velocidade de avanço, maior será a formabilidade, pois a formabilidade está relacionada com o aquecimento localizado, ou seja, quando se diminui o aquecimento também se diminuirá a formabilidade (LOPES, 2013). Pode-se destacar também que com o aumento da velocidade de avanço ocorre também o aumento do retorno elástico da peça, ocasionando erros dimensionais no fim do processo (FRITZEN, 2012).

2.6 Alumínio

Dentre os metais não ferrosos, o alumínio destaca-se como material mais importante na indústria, e juntamente com o ferro/aço são os materiais com maior consumo. O elemento alumínio é abundante na natureza, no Brasil principalmente na forma do minério bauxita. São feitos processos de separação na bauxita para se extrair a alumina, e esta recebe um processo de eletrólise para se obter o alumínio comercial (CHIAVERINI, 1986; ABAL, 2007).

A estrutura cristalina do alumínio é a CFC, cúbica de face centrada, o alumínio apresenta um ponto de fusão de 660°C, que é relativamente baixo comparado com os aços que é de 1570°C, o seu peso específico é de 2,7 g/cm³ sendo, portanto, um material leve comparado também com os aços, onde o alumínio tem aproximadamente 35% do peso dos aços, essa característica é importante na utilização do alumínio na indústria aeronáutica e de transportes. O material apresenta boa condutividade térmica e alta condutividade elétrica, favorecendo a sua utilização na indústria de alimentos, produtos químicos e indústria elétrica principalmente em cabos condutores. Apresenta boa resistência a corrosão, é um material não magnético e com baixo coeficiente de emissão térmica, sendo aplicado como isolante térmico e na proteção de equipamentos eletrônicos, por não produzir faíscas e utilizado no transporte e estocagem de produtos inflamáveis e explosivos. O alumínio possui baixa resistência mecânica, e alta ductilidade, essa última característica faz com que o alumínio seja facilmente laminado, forjado e trefilado, utilizado em forma de chapas, folhas finas, fios e tubos. Possui uma refletividade de 80% permitindo a sua utilização em luminárias, é um material reciclável sendo utilizado na indústria como embalagens (CHIAVERINI, 1986; ABAL, 2007).

2.6.1 Ligas de Alumínio

Os principais objetivos das ligas de alumínio são de aumentar a resistência mecânica do material, sem o fazer perder outras propriedades importantes. Devido a facilidade de se adaptar com a maioria dos elementos de liga, é produzido inúmeras ligas de alumínio cada qual com sua característica dependendo da sua aplicação. É adicionado ao alumínio elementos de liga como magnésio, manganês, cobre, zinco, silício, cada elemento possui uma característica específica que resultará na melhoria de propriedades e características do alumínio, como aumento de resistência mecânica e da resistência a corrosão. As ligas 6061, que são ligas de alumínio, magnésio e silício, AlMgSi, são tratáveis termicamente através do processo de têmpera t6, possuindo uma excelente resistência mecânica, sendo utilizadas principalmente na indústria automobilística, na aviação e embarcações (ABAL, 2007).

2.6.2 Propriedades Mecânicas

Serão apresentadas algumas características mecânicas do alumínio, como por exemplo o limite de resistência à tração, o limite de escoamento, o alongamento, dureza, propriedades em altas e baixas temperaturas e índice de anisotropia. Os valores obtidos são através de ensaios com amostras do material presentes na literatura.

2.6.2.1 Limite de Resistência à tração

O limite de resistência à tração, é obtido através do ensaio de tração, esse limite representa a máxima tensão que o material suporta antes de ocorrer a ruptura. A tensão é calculada através da divisão da carga máxima utilizada pela secção transversal do corpo de prova em mm^2 , a figura 2.19 representa a curva tensão x deformação teórica. Pela literatura o valor para o alumínio puro é de 48 MPa ou 4,9 kgf/mm^2 . (ABAL, 2007).

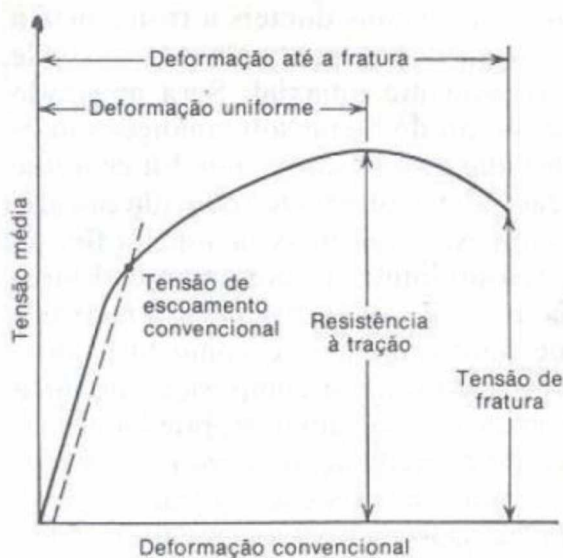


Figura 2.19 - Curva tensão x deformação teórico de engenharia. (Fonte: DIETER, 1981)

2.6.2.2 Limite de Escoamento

O limite de escoamento é basicamente a tensão na qual o material começa a deformar-se plasticamente, representado na figura 2.20. O limite de escoamento para o alumínio puro é de aproximadamente 12,7 MPa ou 1,3 Kgf/mm^2 (ABAL, 2007; CASTELAN, 2007).

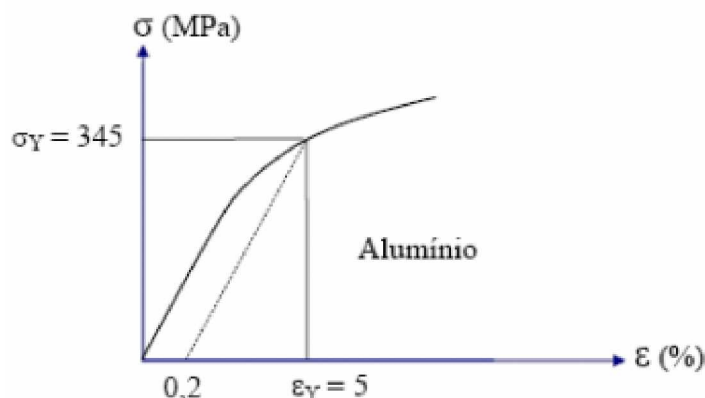


Figura 2.20 – Curva tensão x deformação para o Alumínio.

Fonte – (www.cpgec.ufrgs.br)

2.6.2.3 Alongamento

O alongamento pode ser definido como a indicação de ductilidade do material, é medido através da diferença de comprimentos entre a medição do corpo de prova antes e depois do ensaio de tração. O valor é expresso em porcentagem, e o valor do alongamento varia dependendo da espessura do corpo de prova, ou seja, para corpos de prova mais finos esse alongamento é relativamente menor do que para corpos de prova mais espessos (ABAL, 2007).

2.6.2.4 Propriedades do alumínio em alta e baixas temperaturas

O ponto de fusão do alumínio puro é de 660°C, o material sofre com a fluência se for submetido a tensões em grandes intervalos de tempo em temperaturas acima de 200°C. Com isso o alumínio perde um pouco suas propriedades mecânicas, podendo ocorrer deformação plástica no material, esse fenômeno é conhecido como fluência (ABAL, 2007).

Ao contrário da fragilidade em altas temperaturas, o alumínio reage bem em temperaturas abaixo de zero, mantendo suas características mecânicas e ductilidade até em temperaturas extremamente baixas (ABAL, 2007).

2.6.2.5 Índice de Anisotropia

O índice de anisotropia 'r', mostra a heterogeneidade de um material em função da direção da laminação. O índice é calculado através da divisão entre as deformações na direção da largura e as deformações na espessura, indicando a habilidade do material em resistir a diminuição da espessura, quando submetido a ensaios de tração. Esse índice depende de como

o material é cortado em relação a direção em que foi feita a laminação, para se obter o índice é necessário fazer a média dos valores obtidos em pelo menos três direções de corte diferentes (DALEFFE, 2008).

2.6.3 Estampabilidade do alumínio

O módulo de elasticidade do alumínio puro que é de $E = 65000 \text{ N/mm}^2$, ou seja, bem inferior ao módulo do aço carbono que é de $E = 196000 \text{ N/mm}^2$. Sendo assim o módulo de elasticidade do alumínio é cerca de $1/3$ do módulo de elasticidade do aço. Isso mostra que a energia necessária para se obter a deformação de uma chapa de alumínio é bem menor do que para deformar um aço. Com isso o custo com manufatura para se estampar o alumínio é menor do que para um aço (DALEFFE, 2008). Outro fator importante na estampagem incremental é o do coeficiente de atrito, o alumínio possui um coeficiente de atrito semelhante ao dos aços carbono, em torno de 0,05 (DALEFFE, 2008). Devido também sua ductilidade em seu estado puro, torna-se propício o processo de estampagem incremental em chapas de alumínio.

Através de ensaios no processo de estampagem incremental utilizando chapas de alumínio, na literatura, tem-se como problema, os índices de anisotropia com $r > 1$, com a deformação na espessura maior que na largura, sendo um fator que não favorece o processo de estampagem. Mas ainda como vantagens, é possível obter grandes deformações, com boas profundidades, pequenos esforços exercidos pelo maquinário no processo, e o efeito do retorno elástico não sendo tão influente (DALEFFE, 2008).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Nesse capítulo serão apresentados os dispositivos, materiais e procedimentos utilizados para a realização dos experimentos de estampagem incremental em chapas de alumínio puro.

3.1 Centro de Usinagem CNC

A máquina utilizada nos testes práticos foi disponibilizada pelo (LEPU) Laboratório de Pesquisa e Ensino em Usinagem sendo um Centro de Usinagem Romi Discovery 760, figura 3.1, cujas características são: a dimensões da mesa são 840 x360 mm, o curso do eixo Z é de 508 mm, o curso do eixo Y é 406 mm, curso eixo X é de 760 mm. O peso suportado pela mesa da máquina é de no máximo 350 kgf.

O software utilizado para gerar as simulações foi o FUSION 360 da AUTODESK ele tem como função gerar o código G que é responsável pela trajetória da ferramenta e a movimentação dos eixos da máquina CNC, pelo software foi produzido as dimensões da peça produzida e a sua geometria. A transmissão do código G gerado e a máquina CNC foi feito através de cabos RS232.



Figura 3.1 – Centro de Usinagem CNC, ROMI DISCOVERY 760.

3.2 Suporte Prensa-Chapas

O suporte de fixação das chapas a serem estampadas deve dar sustentação permitindo o perfeito travamento da chapa e ser um componente rígido, resistindo aos esforços provenientes do processo. O suporte produzido possui 16 furos, em concordância com os furos de 4 peças metálicas, onde a chapa a ser estampada é colocada entre o suporte e as peças. Os 16 parafusos são responsáveis pela perfeita fixação da chapa de alumínio no suporte, segue representado abaixo na imagem 3.2.

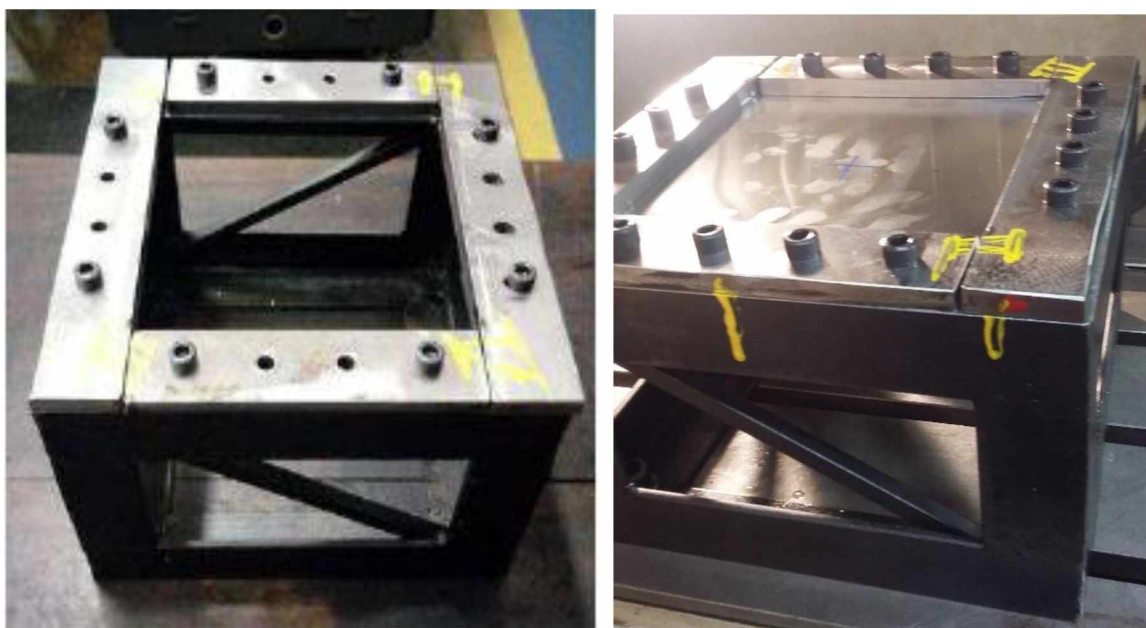


Figura 3.2 – Suporte para fixação da chapa de alumínio puro no processo de estampagem incremental

3.3 Ferramenta de estampagem

A ferramenta de estampagem utilizada nos testes foi produzida de aço AISI 52100, com 98,5 mm de comprimento e a ponta no formato semiesférico de 5,65 mm de diâmetro, conforme a figura 3.3. A ferramenta é acoplada no mandril hidráulico da máquina CNC.

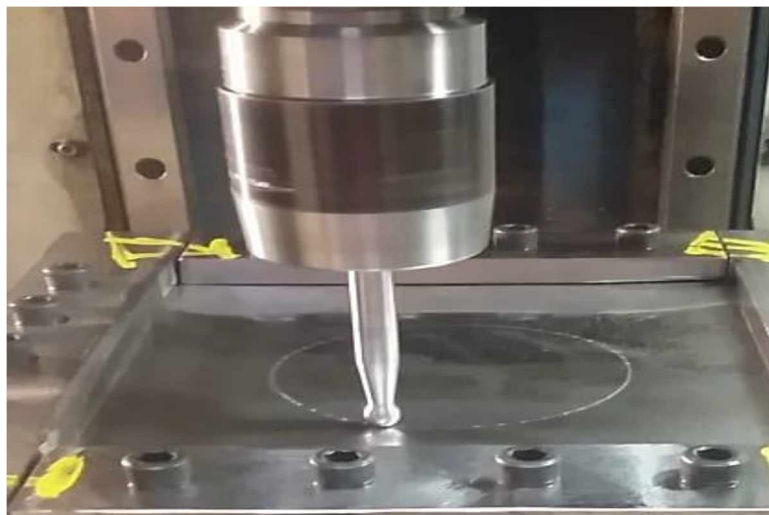


Figura 3.3 – Ferramenta de ponta semiesférica fixada no mandril da máquina CNC.

3.4 Chapas de Alumínio Puro

As chapas utilizadas nos testes deste trabalho são de alumínio comercialmente puro, Al com 99,5% de pureza, espessura de 0,5 mm sendo adquirida com dimensões de 1000x500 mm. Para a realização dos testes, foram retirados corpos de prova quadrados de 240 mm de lado, e para o corte da chapa principal foi utilizado uma tesoura elétrica.

3.5 Geometria da peça

A geometria escolhida para a realização dos testes de estampagem incremental é um tronco de cone com diâmetro de 120 mm e 75 mm de profundidade. Segue a imagem da geometria na figura 3.4. Portanto a ferramenta fará uma trajetória helicoidal cônica na chapa estampada. Com essa geometria pode-se avaliar perfeitamente a conformabilidade do alumínio, pois se trata de uma forma complexa, além de possuir uma profundidade considerável.

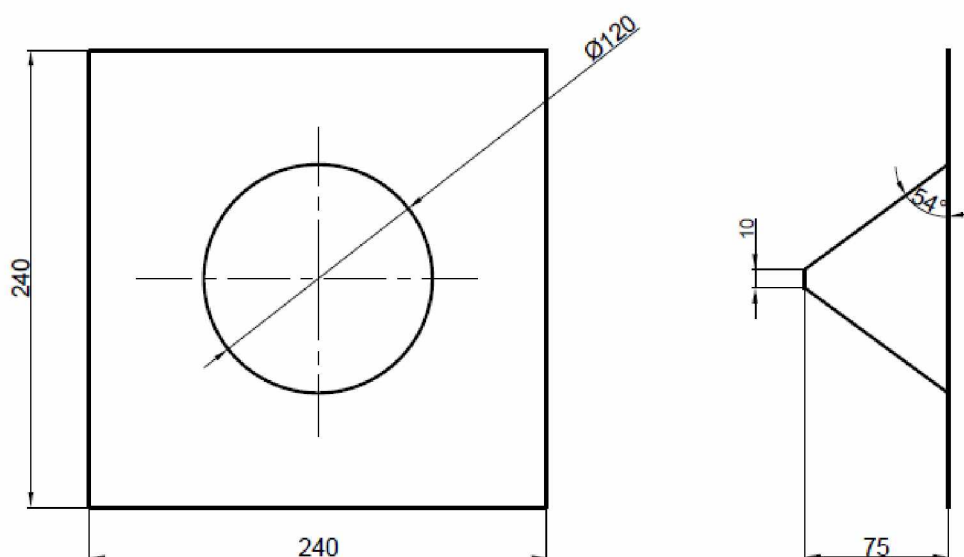


Figura 3.4 – Representação em 2D da geometria da peça a ser estampada, dimensões em mm.

3.6 Lubrificação

Foi utilizado nos testes o óleo SAE 5W30, 100% sintético, também foi feito um teste sem a adição do lubrificante, para avaliar o efeito desse parâmetro no processo de estampagem incremental. É despejado um filme de óleo no início do teste sobre a chapa, e conforme o experimento era executado, se adicionava gradativamente pequenas quantidades do óleo lubrificante, como representado na figura 3.5a e 3.5b.

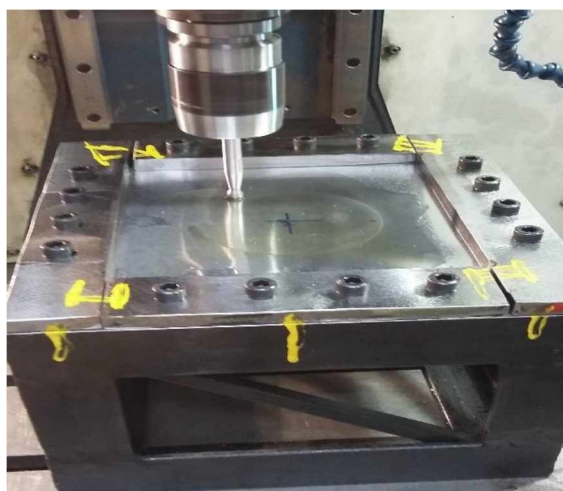


Figura 3.5 – Lubrificante sobre a chapa de alumínio puro. a) Filme de lubrificante sobre a chapa no início do processo. b) Quantidade de lubrificante sobre a chapa no final do processo de estampagem.

3.7 Procedimento Experimental

3.7.1 Ensaio de tração

Para a realização dos testes de tração as chapas de alumínio puro foram cortadas utilizando o método de jato de água abrasivo, as dimensões dos corpos de prova estão estabelecidas na norma ABNT NBR ISO 6892-1, no formato descrito na figura 3.6.

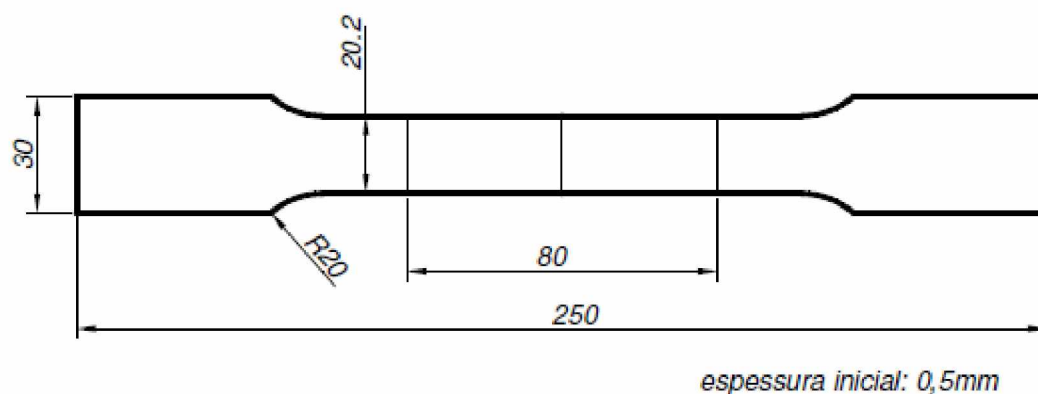


Figura 3.6 – Dimensões e geometria do corpo de prova para ensaio de tração.

(Fonte: CASTELAN, 2007).

Os corpos de prova utilizados no teste foram seccionados em três direções, em relação ao sentido de laminação da chapa de alumínio. Um corpo de prova foi cortado na direção de laminação, o segundo foi seccionado a 90° e o terceiro a 45° quanto ao sentido de laminação. Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaios SHIMADZU, e foram levantadas através do teste as curvas de tensão/deformação do alumínio.

3.7.2 Análise Metalográfica

Foi retirada da chapa de alumínio puro uma amostra de 12x12 mm de dimensão para análise metalográfica do material antes do processo de estampagem ou seja, com tensões na chapa provenientes apenas pelo processo de laminação. Também foi obtida uma amostra com a mesma dimensão, de cada um dos testes realizados neste trabalho, para posterior comparação entre a estrutura cristalina das amostras estampadas em relação à amostra pura. Além disso,

pode-se comparar a variação de estrutura em relação à mudança de parâmetros dos testes realizados.

A chapa de alumínio foi cortada utilizando uma tesoura elétrica, e estas foram embutidas a quente em baquelites, figura 3.7, através de uma prensa embutidora FORTEL EFD. Após serem embutidas as amostras foram lixadas alterando gradativamente a granulometria das lixas d'água, iniciando com a GR 220, utilizando as GR 400 e 600 e finalizando com a lixa GR1200. Em seguida as amostras foram polidas através de uma lixadeira e politriz FORTEL PLF. Antes de serem analisadas pelo microscópio óptico as amostras foram atacadas utilizando um reativo chamado keller, 10 ml de ácido fluorídrico, 15 ml de ácido clorídrico concentrado, 25 ml de ácido nítrico concentrado e 50 ml de água destilada. A análise metalográfica das amostras foi realizada em um microscópio ótico.



Figura 3.7– Amostras de alumínio puro embutidas, lixadas, polidas e atacadas, antes da micrografia.

3.7.3 Medição de rugosidade

Para a realização dos testes de rugosidade, as chapas estampadas em cada teste, foram cortadas através de uma serra elétrica, para retirar amostras da área estampada, a fim de se obter a relação entre os parâmetros de teste e a rugosidade superficial da peça. Foram realizadas cinco medições de rugosidade de cada teste de estampagem, e realizou-se a média e desvio padrão dos resultados. Através do rugosímetro digital TAYLOR HOBSON S100, equipamento utilizado nas medições, com cut-off de $0,8\ \mu\text{m}$ e faixa de medição de 4 mm, pode-se avaliar os parâmetros R_q e R_t . A Rugosidade (R_q), é o valor médio quadrático de todo desvio da superfície em relação a reta de rugosidade média do comprimento de medição, essa análise acentua o efeito dos valores do perfil que se afastaram da média, com isso um único pico ou vale presente

na faixa de medição afetar o valor de R_q . A rugosidade R_t , define a profundidade total de rugosidade, mede a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro da faixa de medição, esse parâmetro pode ser um indicador da ocorrência de falhas na fabricação da peça.

3.7.4 Parâmetros dos Testes

Neste trabalho foram realizados quatro testes, foram mantidas constantes algumas variáveis como: ferramenta utilizada, geometria da peça estampada e rotação da ferramenta, e foi alterado para cada teste, o avanço da máquina em mm/min e o teste 4 foi realizado sem lubrificação, para se avaliar a importância desse parâmetro na estampagem. Os parâmetros de teste estão apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de testes de Estampagem Incremental

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Ferramenta utilizada	Semiesférico de 5,65 mm			
Geometria da peça	Tronco de cone			
Rotação da máquina(rpm)	1000			
Lubrificação	SAE 5W30			Sem lubrificante
Velocidade de avanço(mm/min)	1000	3000	6000	6000

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.2 Ensaio de Tração

No ensaio de tração realizado, puderam-se obter valores para a tensão máxima [MPa] e deformação relativa. Para gerar o gráfico, foi utilizada uma planilha do Excel com os dados de força e deformação e foi construído o gráfico da figura 4.5 para a direção de laminação de 0°.

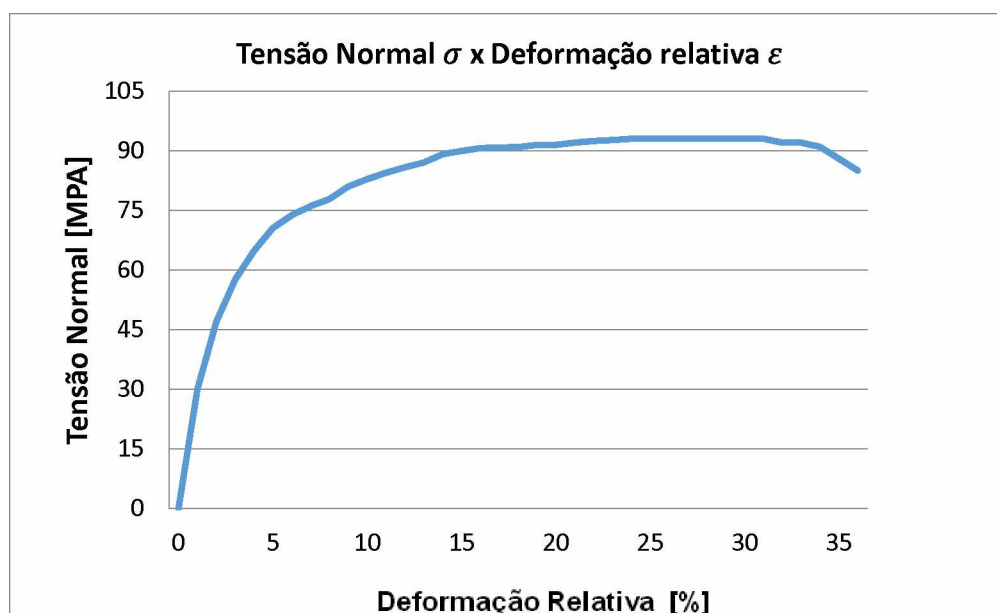


Figura 4.5 – Curva tensão x deformação para sentido de laminação 0°.

O comportamento da curva mostrou-se coerente com a teoria, com o limite de escoamento não tão bem definido, e o limite de resistência a tração com valores próximos aos valores teóricos. Na tabela 4.1 são apresentados os valores do limite de resistência a tração, limite de escoamento e alongamento para os 3 sentidos de laminação avaliados no teste de tração.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do alumínio pelo ensaio de tração obtidas em 3 direções:

DIREÇÃO	σ_e [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ [%]
0°	15,3	93,06	33,5
45°	15,6	90,25	31,2
90°	16,5	88,78	30,4

Segundo o certificado de qualidade do alumínio, os valores correspondentes ao limite de resistência a tração, limite de escoamento e alongamento máximo são representados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores teóricos para testes de tração em alumínio puro:

Valores teóricos	σ_e [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ [%]
	12,7	95	22

Os resultados gerados através do teste de tração estão relativamente próximos aos do certificado de qualidade do alumínio e as diferenças entre os resultados obtidos para cada direção de laminação não foi significativa.

4.2 Testes de Estampagem Incremental

No primeiro teste, com os parâmetros representados na Tab.3.1, a velocidade de avanço de 1000 mm/min, o ensaio foi realizado até o fim do processo, sem interrupções, a peça gerada teve o tronco de cone com 73,1 mm de profundidade, 1,9 mm de diferença em relação a profundidade desejada que é de 75 mm. O retorno elástico da peça foi de 2,53%. A imagem 4.1 representa a peça produzida no teste 1.



Figura 4.1 – Peça estampada após teste 1.

No segundo teste, a velocidade de avanço foi aumentada para 3000 mm/min, um aumento significativo de 300% no valor do parâmetro, e as outras variáveis mantiveram-se constantes, afim de avaliar o efeito desse critério no ensaio de estampagem. E novamente o ensaio foi realizado até o final, a peça gerada teve o tronco de cone com 72,3mm de profundidade, representada pela imagem 4.2. O retorno elástico foi de 2,7mm, ou seja, 3,6% menor do que no modelo projetado no FUSION 360.

O retorno elástico do material foi maior conforme se aumentou os valores da velocidade de avanço. O fenômeno do retorno elástico ocorre pois a força aplicada no material para conformá-lo gera tensões na peça que superam o limite de escoamento e com isso a chapa é deformada, uma vez que a força de conformação é cessada, as regiões da peça que foram submetidas a tensões inferiores ao limite de escoamento, ou sejam, permaneceram em regime plástico, tendem a voltar a posição inicial. Com a velocidade de avanço menor, tem-se um maior tempo do processo de conformação, consequentemente a força aplicada para deformar o material exerce sua influência ponto a ponto na chapa, durante um período maior. Com isso ocorre a diminuição da deformação elástica e consequentemente do efeito mola na chapa.

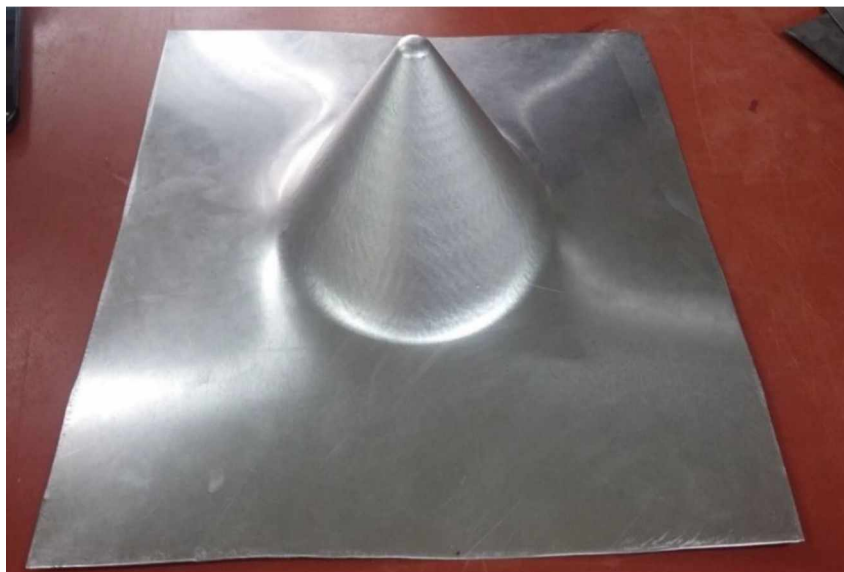


Figura 4.2 – Peça estampada após teste 2.

No terceiro teste, foi aumentado novamente a velocidade de avanço para 6000 mm/min, outro aumento significativo de 200% na grandeza da variável, e mais uma vez as outras variáveis mantiveram-se constantes. O teste foi realizado até o fim, imagem 4.3, percebe-se visualmente uma rugosidade mais grosseira em relação as outras peças, fato comprovado no ensaio de rugosidade e o tronco de cone teve 71,6 mm de profundidade, com um retorno elástico de 3,4 mm, sendo assim, uma diferença dimensional de 4,53% em relação ao modelo projetado. O retorno elástico da peça novamente teve um aumento em relação aos testes anteriores, evidenciando a vinculação com o aumento da velocidade de avanço.



Figura 4.3 – Peça estampada após teste 3.

No quarto teste, a velocidade de avanço foi mantida em 6000 mm/min, mas o teste foi realizado sem a utilização do lubrificante SAE 5W30, e as outras grandezas foram mantidas sem alterações. Não foi obtido sucesso no teste, figura 4.4a e 4.4b, foi interrompido com 18 minutos de duração, pelo rompimento da chapa de alumínio, o ensaio gerou muito ruído e vibração, e aumento de temperatura na chapa, deixando a superfície da chapa totalmente degradada. O tronco de cone até o momento da interrupção do ensaio teve 14 mm de profundidade.



Figura 4.4 – Peça estampada após teste 4. a) Vista superior da peça. b) Detalhe do acabamento superficial e da trinca gerada.

Nos testes de estampagem incremental em alumínio é essencial a utilização da lubrificação, o ensaio a seco gera um grande coeficiente de atrito entre a ferramenta e a chapa. Com a rotação da ferramenta, ocorre a concentração de calor em um ponto da chapa, conforme a ferramenta se movimenta de acordo com a velocidade de avanço, ocasiona variações na temperatura da peça durante todo o percurso, essas variações originam tensões de tração e compressão na chapa. Esse efeito gera a criação e propagação de trincas, como ocorreu no teste 4. Portanto, afim de se melhorar a rugosidade, diminuir as forças de atrito, a temperatura da chapa e melhorar a dissipação de calor, é necessário a utilização de lubrificantes.

4.3 Análise de Rugosidade

As análises de rugosidade são apresentadas nos gráficos da figura 4.7 e 4.8, estão representados os valores do Desvio médio quadrático (R_q) e profundidade da rugosidade (R_t).

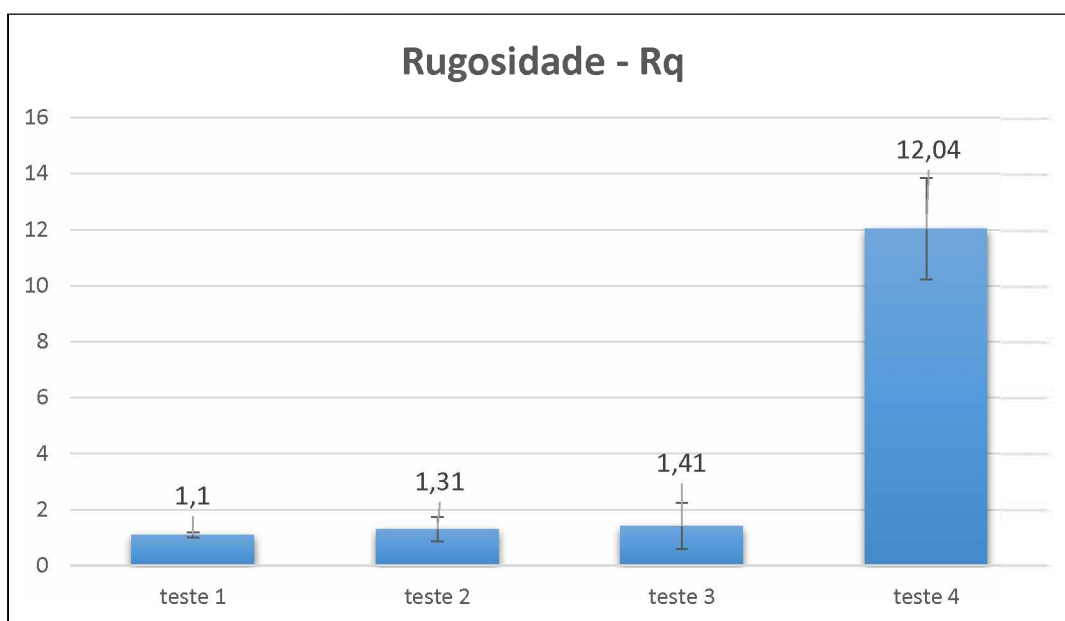


Figura 4.7 – Gráfico demonstrativo dos resultados para o parâmetro de rugosidade R_q .

Nota-se um aumento da rugosidade R_q , conforme se eleva os valores da velocidade de avanço, que é o parâmetro analisado nos testes 1, 2, 3. Isso pode ser explicado pelo crescimento do atrito entre a ferramenta e a chapa de alumínio, provocando o aquecimento da chapa e consequentemente do fluido, fazendo-o perder suas propriedades lubrificantes. No teste 4, sem lubrificação, mostra um alto valor de rugosidade, resultado já esperado, devido ao acabamento obtido no ensaio.

A figura 4.8 representa o gráfico da profundidade de rugosidade (R_t) com os valores médios dos quatro testes de estampagem incremental.

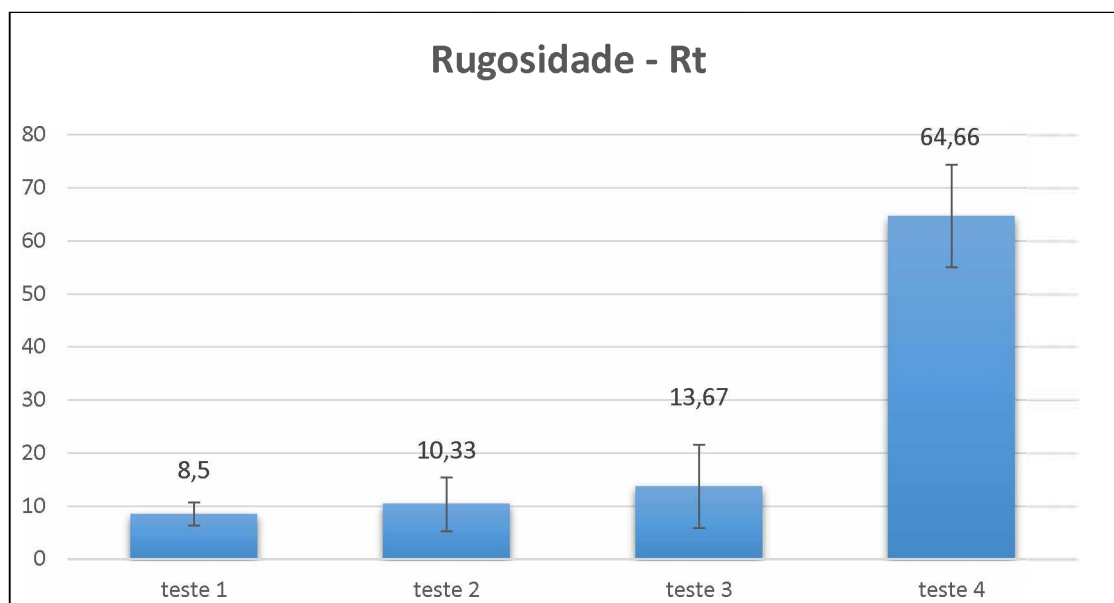


Figura 4.8 – Gráfico demonstrativo dos resultados para o parâmetro de rugosidade R_t .

A variável R_t teve o mesmo comportamento de R_q , evidenciando assim, a relação entre velocidade de avanço e rugosidade. Outra causa para o aumento da rugosidade em relação a elevação da velocidade de avanço, é quando a capacidade de transmissão de dados para a máquina CNC é menor que a velocidade de avanço, perdendo-se a interpolação por polinômio de segundo e terceiro grau, na trajetória da máquina, para polinômios de primeiro grau (seguimentos de retas), gerando assim discontinuidades na movimentação da ferramenta, prejudicando o acabamento superficial. (SOUZA, 2008)

4.4 Análise Metalográfica

Como critério de comparação foi realizado uma análise da seção transversal da chapa de alumínio puro, sem a execução de nenhum processo de estampagem anterior, representado na figura 4.9. Através deste teste podem-se comparar as mudanças na microestrutura do alumínio após os testes de estampagem incremental.

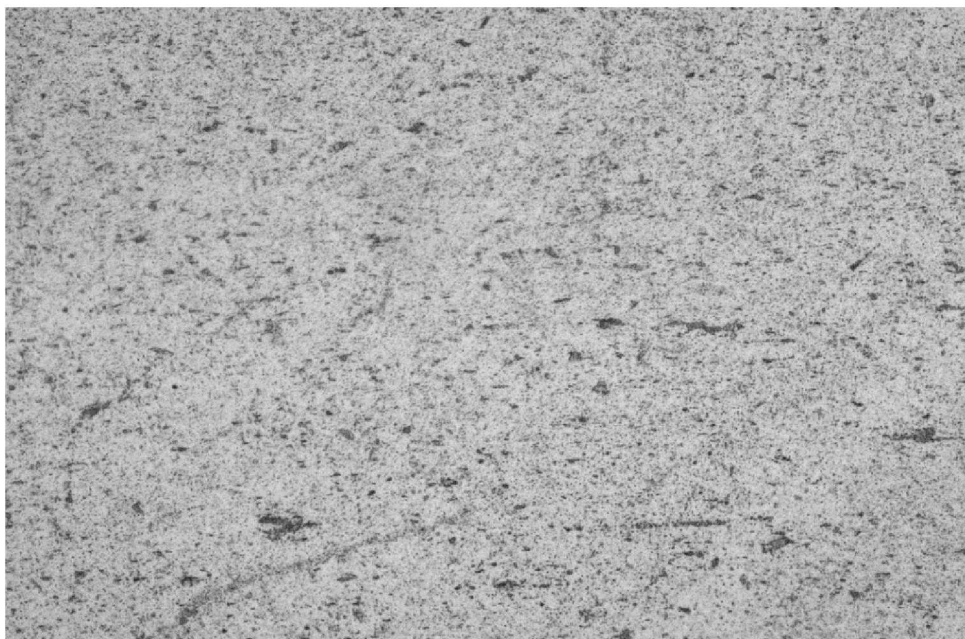


Figura 4.9 – Análise Metalográfica do alumínio não submetido ao processo de estampagem incremental.

A figura 4.9 representa uma matriz de alumínio (solução sólida α) na cor cinza juntamente com partículas dispersóides. Os pontos na cor preta na imagem são os microconstituintes presentes na matriz. Pode-se perceber uma granulometria mais fina e com pouca incidência de microconstituintes (DALEFFE, 2008). A figura 4.10 representa a análise metalográfica do alumínio no teste 4.

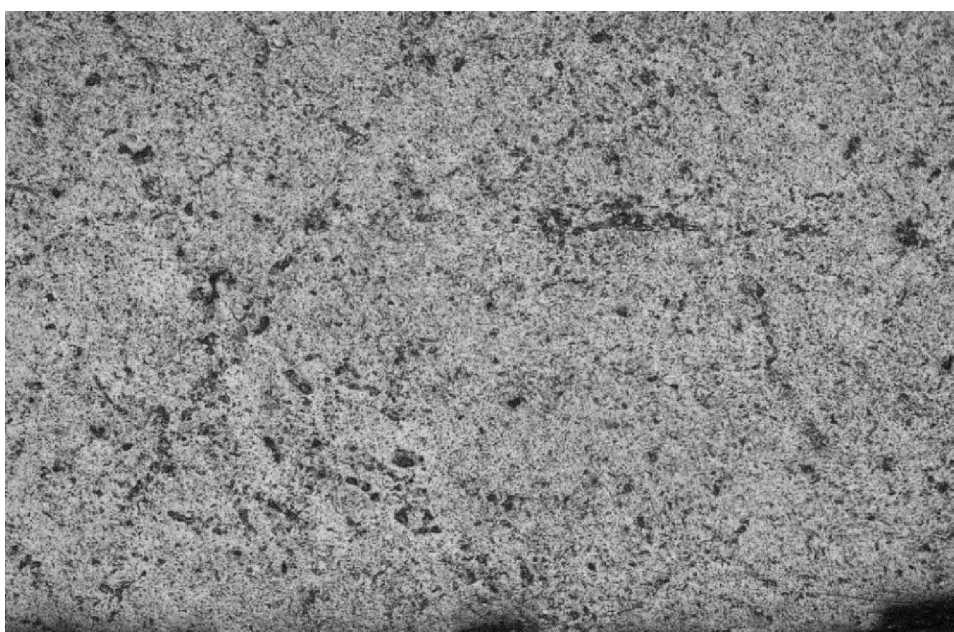


Figura 4.10 – Análise Metalográfica do alumínio após o teste 4.

Na figura 4.10, nota-se o aparecimento de uma estrutura mais rugosa (grosseira) com uma característica de relevo, que pode ser explicada devido a deformação dos grãos gerada pelo processo de estampagem incremental. Com a análise metalográfica não foi possível identificar a direção de laminação das chapas de alumínio e também não foi possível contemplar os contornos de grãos. Mas consegue-se verificar, comparando as imagens 4.9 e 4.10, pequenas modificações superficiais no alumínio, ocasionadas pela deformação plástica com a modificação dos grãos da estrutura.

As variações na estrutura das amostras ocorreram principalmente pelo aumento de temperatura que ocorreram na chapa durante o processo de estampagem, e também pela deformação plástica gerada pela aplicação de tensões na superfície da chapa.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

A aplicação de estampagem incremental utilizando máquinas CNC, mostrou-se satisfatória. Com um ferramental relativamente simples e barato, suporte prensa-chapas, ferramenta de base semiesférica, além da comunicação simultânea entre o computador e a máquina para transferência do código gerado através da geometria da peça, é possível produzir peças utilizando o processo de estampagem sem a dependência de uma matriz. Entretanto, o grande tempo para se executar os ensaios, impede uma produção em grande escala, sendo ideal para pequenos lotes.

A utilização das chapas de alumínio puro rendeu a produção de peças com acabamento superficial satisfatório e rugosidade baixa. O retorno elástico das peças tiveram valores significativos mas esse efeito pode ser controlado, sendo um objeto de estudo para trabalhos futuros, a lubrificação mostrou-se um parâmetro extremamente importante na estampagem, pois a sua não utilização acarretou no rompimento da chapa no teste 4, e a variação da velocidade de avanço, principal parâmetro deste trabalho, apresentou diferenças nos aspectos geométricos e superficiais.

Analizando a variação geométrica através da alteração dos valores da velocidade de avanço, conclui-se que conforme se aumenta o avanço da máquina, é propenso aumentar o efeito do retorno elástico do material além de prejudicar a rugosidade da peça. Do ponto de vista estrutural obtido através das micrografias, o aumento do avanço provoca variações micro estruturais nas chapas, devido ao aumento de temperatura que o processo proporciona à peça e as deformações plásticas geradas no processo.

Conclui-se que a utilização de velocidades de avanço menores, traz maiores benefícios a qualidade da peça gerada, mas requer um tempo maior do processo. Deve-se definir um valor ideal para o parâmetro partindo do ponto de vista de qualidade da peça e da produtividade exigida.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS

ABAL, Associação Brasileira do Alumínio; Fundamentos e Aplicações do Alumínio, 2007

BRESCIANI Filho, E (coord.); ZAVAGLIA, C. A. C; BUTTON, S. T; GOMES, E; NERY F. A da C. Conformação Plástica dos Metais. Campinas: Editora da Unicamp, 1997 (5a. edição), 383p. Tonini.

CARDOSO, Juliano Ferreira. Uso de chapa de zinco no processo de estampagem incremental variando o fluido lubri-refrigerante. 2017. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

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

CASTELAN, Jovani; Utilização das tecnologias CAD/CAM para estampagem incremental do alumínio série 1000; Porto Alegre, 2007.

CHIAVERINI, Vicente, 1986 - Tecnologia Mecânica, materiais de construção mecânica. São Paulo, Editora McGraw-Hill, (2a. Edição).

CHIAVERINI, Vicente, 1986 - Processos de Fabricação e Tratamento. São Paulo, Editora McGraw-Hill, (2a. Edição).

COLPAERT, H., Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns, 3ª. ed. São Paulo, Edgard Blucher, 1974.

DALEFFE, A. Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/16205>> Acesso em 08 de setembro de 2016.

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

FRITZEN, Daniel; Estudo do processo estampagem incremental em chapa de latão 70/30, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/49294>> Acesso em 08 de setembro de 2016.

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

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

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

LACERDA, J; DALEFFE, A; Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro. Disponível em: Revista Vincci– Periódico Científico da Faculdade SATC, v. 1, n. 1, p. 99-119, jan./jul., 2016.

LOPES, T. F. S. Estampagem Incremental: Compensação do Retorno Elástico e Análise à Rotula. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013. Dissertação de Mestrado.

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

MARCONDES, P. V. P. Manufatura de chapas metálicas - dobramento. Ferramental - Revista Brasileira da Indústria de Ferramentas, p. 27-32,2009.

NETO, Lauro Felipe de Araújo. Estampagem incremental em chapa de aço inox 430 utilizando ferramenta de ponta semiesférica variando o fluido lubri-refrigerante. 2018. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

OLIVEIRA, Bruno José. Fabricação de peças complexas em chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304 utilizando o método de estampagem incremental. 2018. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

ROCHA, Otávio Fernandes Lima da. Conformação mecânica / Otávio Fernandes Lima da Rocha. — Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012. 68p.

SCHAEFFER, L. e A. Rocha. Conformação mecânica – Cálculos aplicados em processos de Fabricação. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007.

SHIGLEY, J. E; Mishke, C. R.; Projeto de Engenharia Mecânica, Bookman, 7ª edição, 2005.

TIBURI, Fabio; Aspectos do processo de estampagem incremental; Porto Alegre, 2007.

