



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia



Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGE3M

**ANÁLISE DE PARÂMETROS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL  
PARA ALUMÍNIO PURO**

Andrison Rodrigues Teixeira

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre  
2019

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGE3M

**ANÁLISE DE PARÂMETROS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL  
PARA ALUMÍNIO PURO**

Andrison Rodrigues Teixeira  
Tecnólogo em Automação Industrial

Trabalho realizado junto ao Laboratório de Transformação Mecânica do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre  
2019

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. Lirio Schaeffer  
PPGE3M/UFRGS

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Fernando Folle - Centro Universitário Ritter dos Reis

Prof. Dr. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler – Faculdade SATC

Prof. Dr. Vinicius Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSul)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGE3M

*À minha família  
Graziela Pereira Teixeira,  
Larissa Pereira Teixeira e  
Laura Pereira Teixeira.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, em primeiro lugar, por permitir e colocar as oportunidades em minha vida, através de pessoas e amigos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Ing Lirio Schaeffer, pela ajuda e contribuições com seu conhecimento na preparação e elaboração dessa dissertação, com dedicação, seriedade e ética.

À minha esposa, Graziela Pereira Teixeira, por sempre estar ao meu lado e me apoiar e ser companheira em todos meus projetos.

Ao Professor do MSc, Anderson Fraga, do Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS), pelo apoio e contribuição do seu conhecimento neste trabalho.

Ao Colega Wagner Cardoso, Coordenador de Manutenção da empresa Harman do Brasil, pelo incentivo e apoio na realização deste trabalho.

À Empresa G1 Equipamentos, por disponibilizar sua estrutura e recursos sem medir esforços para a execução dos experimentos práticos e às análises necessárias para a dissertação.

Ao Colega Gustavo Martins Teixeira, pela disponibilidade e prestação de serviços na programação de operação CNC.

Ao colega Juliano Boeira Ercolani, pelo apoio e dedicação nas realizações dos ensaios no Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>9</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>10</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>11</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>13</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	15
1.2 OBJETIVO GERAL .....	15
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL .....	17
2.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL .....	23
2.3 TIPOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL .....	25
2.3.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO (SPIF) .....	25
2.3.2 ESTAMPAGEM INCREMENTAL (TPIF) .....	28
2.3.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL POR MÚLTIPLOS PASSES .....	31
2.4 LIMITAÇÃO PELA GEOMETRIA DA PEÇA .....	32
2.5 VELOCIDADE DA FERRAMENTA DE CONFORMAÇÃO .....	36
2.6 FERRAMENTA DE CONFORMAÇÃO .....	38
2.7 LUBRIFICAÇÃO .....	41
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>43</b>
<b>4 ANÁLISE EXPERIMENTAL</b> .....	<b>46</b>
4.1 EXPERIMENTOS COM FERRAMENTA DE DIÂMETRO 9,5 MM .....	47
4.2 EXPERIMENTOS COM FERRAMENTA DE DIÂMETRO 22 MM .....	53
<b>5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS</b> .....	<b>56</b>
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>57</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>58</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>59</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Estampagem Incremental de Ponto Único, (b) Estampagem Incremental de Dois Pontos .....	14
Figura 2: Diagrama de Blocos .....	16
Figura 3: Torno de Repuxo.....	19
Figura 4: Braço Robótico – Martelamento .....	21
Figura 5: Variantes de Estampagem Incremental .....	22
Figura 6: Ciclo de Aplicação da Estampagem Incremental .....	22
Figura 7: Tipos de Estampagem Incremental.....	24
Figura 8: Estampagem Incremental com Ponto de Apoio .....	24
Figura 9: Representação Esquemática de SPIF .....	26
Figura 10: TPIF com Matriz Positiva na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b) .	29
Figura 11: TPIF com Matriz Negativa na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b)	29
Figura 12: TPIF com Apoio Genérico Fixo na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b).....	30
Figura 13: TPIF com Apoio Genérico Móvel utilizando robôs (a) e detalhe ampliado do processo (b) .....	31
Figura 14: Processo MSPIF e o efeito de encruamento da chapa a cada passe .....	32
Figura 15: Redução da espessura de parede .....	33
Figura 16: Relação entre o ângulo de parede e a espessura da chapa no processo de Estampagem Incremental.....	34
Figura 17: Variação da inclinação da chapa .....	35
Figura 18: Diagrama de correção de desvios.....	36
Figura 19: Ferramenta de conformação com ponta esférica de movimento “livre” ....	37
Figura 20: Ferramentas com extremidade esférica sólida de conformação .....	38
Figura 21: Contato da parede da chapa com a ferramenta de conformação. ....	38
Figura 22: Ferramentas de conformação de ponta esférica sólida com 6, 10 e 30mm de diâmetro e com ponta de plástico (direita).....	39
Figura 23: Influência do diâmetro da ferramenta no ângulo máximo da parede .....	40
Figura 24: Comparação entre vários diâmetros de ferramenta no diagrama limite de .....	41

Figura 25: Ferramenta utilizando como lubrificante graxa convencional.....	42
Figura 26: Dispositivo para realização dos experimentos de Estampagem Incremental.....	44
Figura 27: (a) Ferramenta $\varnothing$ 22 mm e (b) Ferramenta $\varnothing$ 9,5 mm .....	44
Figura 28: Percurso da ferramenta nos experimentos .....	45
Figura 29: (a) Realização dos experimentos com Ferramenta $\varnothing$ 22mm e (b) com Ferramenta $\varnothing$ 9,5mm .....	46
Figura 30: Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200-H14..	46
Figura 31: Perfil do canal estampado após ensaios de Estampagem Incremental ...	48
Figura 32: Deformações na chapa estampada:.....	48
Figura 33: Relação de rotação (N) e deformação ( $\varphi$ 1) para cada velocidade de avanço (a) nos experimentos de Estampagem Incremental, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm .....	50
Figura 34: (a) Superfície externa com irregularidades - experimento 10 e (b) sem irregularidades - demais experimentos .....	51
Figura 35: (a) Superfície interna com irregularidades - experimento 10 e (b) sem irregularidades (demais experimentos) .....	52
Figura 36: Retas Limite de Fratura (RLF) para Estampagem Incremental de AA1200, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm. ....	53
Figura 37: Relação de rotação (N) e deformação ( $\varphi$ 1) para cada velocidade de avanço (a) nos experimentos de Estampagem Incremental, com ferramenta de diâmetro 22 mm .....	54
Figura 38: Retas Limite de Fratura (RLF) para Estampagem Incremental de AA1200, com ferramenta de diâmetro 22 mm. ....	56



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200, com $\Delta z = 0,5$ mm, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm .....	47
Tabela 2: Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200, com $\Delta z = 0,5$ mm, com ferramenta de diâmetro 22 mm .....	53

**LISTA DE ABREVIATURAS**

CAD	Desenho Assistido por Computador ( <i>Computer-Aided Design</i> )
CAE	Engenharia Assistida por Computador ( <i>Computer-Aided Engineering</i> )
CAI	Inspeção Assitida por computador ( <i>Computer-Aided Inspection</i> )
CAM	Manufatura Assistida por Computador ( <i>Computer-Aided Manufacturing</i> )
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CAPP	Planejamento de Processo Assistido por Computador ( <i>Computer-Aided Process Planning</i> )
FEM	Método de Elementos Finitos
ISF	<i>Incremental Sheet Forming</i>
MSPIF	Estampagem Incremental de Ponto Único por Múltiplos Passes ( <i>Multi Single Point Incremental Forming</i> )
NC	Controle Numérico ( <i>Numerical control</i> )
PPGE3M	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
RLF	Reta Limite de Fratura
SPIF	Estampagem Incremental de Ponto Único ( <i>Single Point Incremental Forming</i> )
TPIF	Estampagem incremental ( <i>Two Points Incremental Forming</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Avanço da ferramenta	(mm/min)
$h_1$	Profundidade estampada em que ocorre a trinca	(mm)
$N$	Rotação da ferramenta	(rpm)
$s_0$	Espessura inicial da chapa	(mm)
$s_1$	Espessura final da chapa	(mm)
$d_1$	Comprimento da elipse	(mm)
$d$	Diâmetro do círculo gravado na chapa	(mm)
$d_2$	Largura da elipse	(mm)
$df$	Diâmetro de Ferramenta	(mm)
$R_c$	Raio Crítico da Ferramenta	(mm)

### Símbolos gregos:

$\Delta_z$	Incremento vertical da ferramenta	(mm)
$\varphi$	Deformação verdadeira	(-)
$\varphi_1$	Deformação verdadeira no comprimento	(-)
$\varphi_2$	Deformação verdadeira na largura	(-)
$\varphi_3$	Deformação verdadeira na espessura	(-)
$R_c$	Raio crítico da ferramenta	
$\Psi$	Inclinação da parede de chapa	(°)
$\Psi'$	Ângulo de parede inicial	(°)
$\lambda$	Ângulo Eixo Vertical	(°)

## RESUMO

Neste trabalho é apresentada a análise da influência do diâmetro da ferramenta, bem como das velocidades de avanço e de rotação na Estampagem Incremental de alumínio puro. Foram realizados 24 experimentos em chapas de alumínio puro AA1200, com dimensões 1 x 60 x 160 mm. Mantendo-se o incremento vertical ( $\Delta_z$ ) constante em 0,5 mm e variando o diâmetro da ferramenta ( $d_f$ ) entre 9,5 mm e 22 mm, o avanço da ferramenta ( $a$ ) entre 200 mm/min, 400 mm/min e 800 mm/min e a rotação (N) entre 200 rpm, 400 rpm, 800 rpm e com o *spindle* livre (sem rotação). Nestes ensaios foi verificado que é possível obter maior estampabilidade da chapa pelo processo de Estampagem Incremental combinado baixa velocidade de avanço com alta rotação, independente do diâmetro da ferramenta, ainda que nos experimentos com diâmetro da ferramenta com 22 mm seja pouco sensível à variação dos parâmetros. Também se conclui que as maiores deformações são obtidas à medida que se diminui o diâmetro da ferramenta e que é possível determinar diferentes Retas Limites de Fratura para o mesmo material de acordo com a variação dos parâmetros selecionados para processo de Estampagem Incremental.

**Palavras-chaves:** Estampagem Incremental, Avanço, Rotação, Diâmetro da Ferramenta.

## ABSTRACT

This work presents the analysis of the influence of the tool diameter, as well as the feed rate and rotation speed in the Incremental Sheet Forming of pure aluminum. Twenty - four experiments were performed on AA1200 pure aluminum sheets, with dimensions 1 x 60 x 160 mm. Keeping the step down ( $\Delta_z$ ) constant at 0.5 mm and change the tool diameter ( $d_f$ ) between 9.5 mm and 22 mm, the feed rate of the tool ( $a$ ) between 200 mm/min, 400 mm/min and 800 mm/min and the rotation speed ( $N$ ) between 200 rpm, 400 rpm, 800 rpm and with the free spindle (without rotation). In these tests it was verified that it is possible to obtain greater formability of the sheet by the Incremental Sheet Forming process combined with a low feed rate with high tool rotation speed, independent of the diameter of the tool, although in the experiments with tool diameter with 22 mm it is not very sensitive the variation of the parameters. It is also concluded that the higher formability are obtained as the tool diameter decreases and it is possible to determine different Fracture Forming Limit Diagram for the same material according to the variation of the parameters selected for the Incremental Sheet Forming process.

**Keywords:** Incremental Sheet Forming, Feed Rate, Rotation Speed, Tool Diameter.

## 1 INTRODUÇÃO

A Estampagem Incremental (*Incremental Sheet Forming*) é um processo de fabricação aplicado à conformação de chapas metálicas que pode ser realizado tanto em máquinas dedicadas à Estampagem Incremental, como em fresadoras, centro de usinagem CNC ou ainda através de um braço robótico (JESWIET *et al.*, 2005).

O processo possui duas variações principais:

- a) a Estampagem Incremental de Ponto Único (*Single Point Incremental Sheet Forming*): onde uma chapa fixada por um prensa chapas sofre deformação pelo movimento de uma ferramenta de ponta semiesférica em movimento de rotação e realizando incrementos progressivos contra a chapa metálica nos eixos X, Y e Z, conferindo a ela a forma desejada;
- b) a Estampagem Incremental de Dois Pontos (*Two Points Incremental Sheet Forming*): onde uma matriz é posicionada abaixo da chapa metálica, o que confere ao produto estampado maior precisão, permitindo que a chapa assuma a forma desejada quando um perfil mais complexo é exigido (KOPAC; KAMPUS, 2005), conforme indicado na Figura 1 a e b.

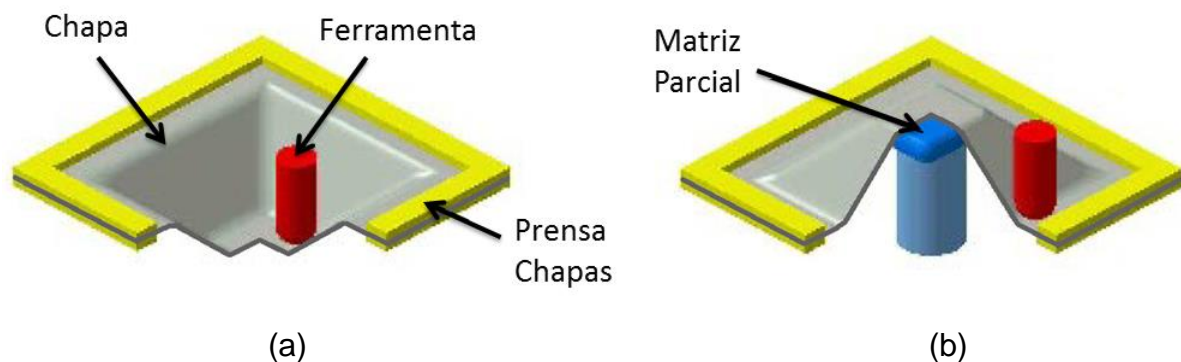


Figura 1: (a) Estampagem Incremental de Ponto Único, (b) Estampagem Incremental de Dois Pontos  
Fonte: BAMBACH, 2004

A Estampagem Incremental de Dois Pontos pode ser realizada com matriz parcial positiva ou negativa, ou, ainda, com matriz completa positiva ou negativa, dependendo do formato que se deseja conformar (CASTELAN, 2010).

A utilização de uma matriz parcial não é um caso que exija muito tempo ou recursos, já que matriz pode ser fabricada na própria máquina CNC, onde se realizará a estampagem (KOPAC; KAMPUS, 2005). Assim sendo, não há necessidade da matriz ser fabricada em aço ferramenta, podendo-se destinar a este propósito materiais mais acessíveis, como aço comum ou poliuretano rígido de alta densidade (CASTELAN, 2010).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Para realização de Estampagem Incremental, é necessário definir os parâmetros de avanço, rotação, incremento vertical e diâmetro da ferramenta. Somente é possível definir estes parâmetros através da realização de experimentos práticos.

Este trabalho apresenta uma análise detalhada da influência das velocidades de avanço e rotação da ferramenta na deformação máxima obtida pela chapa metálica estampada.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo analisar e comparar diversos experimentos práticos de TPIF (Estampagem incremental - *Two Points Incremental Forming*), a fim de verificar a influência dos parâmetros de avanço e rotação neste processo.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Esse trabalho teórico, tem os seguintes objetivos específicos:

- a)** Avaliar a influência do avanço e da rotação em relação a estampabilidade do alumínio puro;
- b)** Comparar as máximas deformações obtidas através da variação do diâmetro da ferramenta;
- c)** Determinação das Retas Limite de Fratura (RLF) para os experimentos.

Conforme diagrama de blocos apresentado pela Figura 2, mostra as etapas realizadas na dissertação.

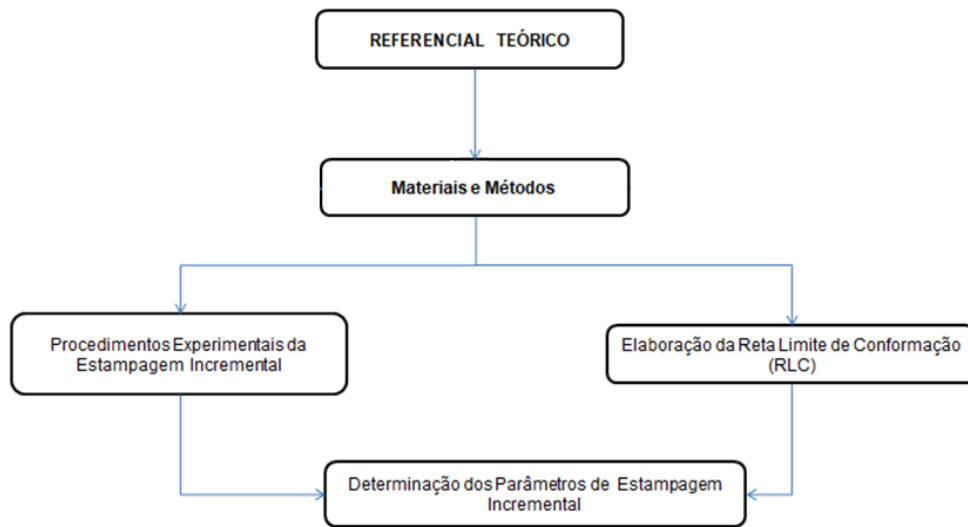


Figura 2: Diagrama de Blocos  
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são descritos os processos de Estampagem Incremental, análise de parâmetros, descrição do processo, variações, vantagens, desvantagens e suas aplicações.

A Estampagem Incremental é um processo utilizado na prototipagem de produtos fabricados por conformação de chapas metálicas, bem como na fabricação de pequenos lotes de peças estampada. Este processo não necessita de ferramental sofisticado ou da utilização de prensa, podendo ser facilmente realizado em uma fresadora CNC.

Diversos estudos relacionam os parâmetros de destaque com influência no processo de Estampagem Incremental, como a temperatura do processo (AL-OBAIDI; KRÄUSEL; LANDGREBE, 2016), a lubrificação utilizada (AZEVEDO *et al.*, 2015), a espessura da chapa e o ângulo de parede formado na estampagem (DUFLOU *et al.*, 2008a), bem como o diâmetro (AL-GHAMDI; HUSSAIN, 2015), o incremento vertical ( $\Delta z$ ) (BHATTACHARYA; MANEESH; CAO, 2011), o avanço ( $a$ ) (AMBROGIO; FILICE; GAGLIARDI, 2012; BARUAH; PANDIVELAN; JEEVANANTHAM, 2017) e a rotação ( $N$ ) (XU *et al.*, 2013) da ferramenta.

### 2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

A Estampagem Incremental é um processo de conformação mecânica, uma tecnologia recente em relação aos processos convencionais que utiliza equipamentos CNC adaptados ou específicos para o trabalho, com ferramentas simples e de baixo custo, possibilitando a manufatura de chapas de diversas geometrias.

A indústria 4.0 vem forçando o mercado industrial a se modernizar com recursos voltados à velocidade e versatilidade do produto final, com peças customizadas, com qualidade técnicas e aparências visuais sofisticadas. Para atender esse mercado, é necessário o uso de ferramentas computacionais, como: CAD – Desenho Assistido por Computador (*Computer-Aided Design*); CAE –

Engenharia Assistida por Computador (*Computer-Aided Engineering*); CAPP – Planejamento de Processo Assistido por Computador (*Computer-Aided Process Planning*); CAM – Manufatura Assistida por Computador (*Computer-Aided Manufacturing*); CAI – Inspeção Assistida por Computador (*Computer-Aided Inspection*), entre outros. Esta evolução permite que os processos de manufatura ultrapassem os limites impostos pelos departamentos de uma organização industrial (FRITZEN, 2012).

A conformação de chapas abrange os processos de fabricação como: cisalhamento, dobramento, laminação, forjamento, trefilação, extrusão e repuxo. Normalmente os processos de conformação necessitam de componentes de formas especiais para viabilizar os processos, tem um custo alto e um prazo de fabricação demorado (SCHAEFFER, 2004).

A velocidade e a competitividade na atualidade forçam as empresas a oferecer novos produtos com rapidez em seus desenvolvimentos, fabricação e comercialização, com o custo atrativo perante a concorrência, cumprindo as necessidades do consumidor final. Com base nesse princípio, no ano de 1994, Matsubara implantou o conceito de Estampagem Incremental como o método e o processo prático para obtenção de protótipos, peças feitas com formatos especiais, com lotes pequenos e de forma rápida e com custo baixo, essa manufatura conhecida como prototipagem rápida (EMMENS; SEBASTIANI; BOOGAARD, 2010).

A dificuldade no processo tradicional de estampar paredes finas e longas abriu espaço ao processo de Estampagem Incremental de chapas, assim introduzindo essa tecnologia (*Incremental Sheet Forming - ISF*) (JESWIET *et al.*, 2005). O processo de Estampagem Incremental tem como foco a fabricação de lotes pequenos ou a prototipagem de produtos de concepção por estampagem (LORA, 2014). O processo de estampagem abrange várias operações de manufatura realizadas em chapas metálicas, para obtenção de formas e geometrias produzidas por dobras, formas de cavidades, ressaltos, repuxos e furos.

O processo de Estampagem Incremental foi patenteado no ano de 1967 (LESZAK, 1967). Os métodos para a conformação de materiais sem o uso de matrizes vêm permitindo avanços no estudo das metodologias em processos da conformação de chapas de metal, podendo ser realizadas suas transformações mecânicas em suas formas desejadas e em formatos 3D, utilizando ferramentas simples e baratas (LESZAK, 1967 *apud* FRITZEN, 2012).

Pesquisas têm sido realizadas em diversas áreas e aplicações com o objetivo de atingir resultados em campos de atuação como área médicas, prótese de crânio em titânio (CASTELAN, 2010), setor da indústria mecânica, coletores solares em alumínio (ARRUDA, 2010), setor da indústria termoplástica com material polimérico (MARTINS *et al.*, 2009), setor da indústria Automobilística (AMINO *et al.*, 2014), entre outros.

Atualmente percebe-se esse processo promissor no que diz respeito à conformação mecânica em material em chapa, estando associado a novos processo de aplicação, como no caso da prototipagem rápida, onde a produção seriada não tem importância e sim produtos otimizados e únicos (DE SENA, 2009). No processo de conformação é permitido eliminar desperdício de matéria-prima, tendo um melhor aproveitamento do material, visando a produtividade, eliminando etapas em outros equipamentos convencionais. Essa redução de sobras ou até mesmo a eliminação de geração de cavados permite a redução do custo de fabricação do produto final, entretanto não se consegue tolerâncias similares as do processo de usinagem (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Segundo Amino *et al.* (2014), a Estampagem Incremental não é um método de fabricação novo, o mesmo é utilizado em processo de estampagem convencional, pois existem etapas de conformação que podem ser atribuídas ao método de Estampagem Incremental. Um bom exemplo desse método é o de fabricações de painéis feito em tornos de repuxo pelo estiramento, conforme Figura 3, no qual é utilizado uma ferramenta e um mandril. O mandril é fabricado com o formato interno da peça que se deseja ser fabricada e a ferramenta tem formatos similares e raiados parecidos com o formato externo do produto a ser fabricado para facilitar a conformação.

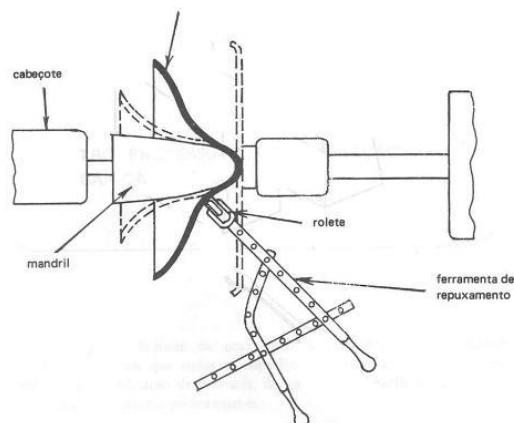


Figura 3: Torno de Repuxo

Fonte: RODRIGUES; MARTINS, 2009

Durante esse método, a ferramenta é direcionada e pressionada contra a chapa de aço que gira fixada ao mandrilo torno de repuxo é adaptado para esse processo formando assim uma peça cilíndrica com o formato do mandril, no entanto, a forma intermediária depende diretamente do dispositivo do torno, assim a ferramenta tende a assumir um trajeto com o formato externo do produto, ou seja, o caminho que a ferramenta executa durante o processo.

O repuxo é considerado um dos processos originais da conformação incremental de chapas, a conformação por repuxo e a conformação incremental apresentam características similares, o repuxo é um processo tecnológico destinado à fabricação de peças cilíndricas semelhantes as produzidas por estampagem cilíndrica convencional profunda. O repuxo é realizado em máquinas convencionais do tipo tornos e é adequado à fabricação de peças com geometrias cónicas e cilíndricas das mais variadas dimensões, podendo ser realizado a frio ou a quente.

Outro exemplo, citado por Amino *et al.* (2014), de deformação plástica que é desenvolvido de forma incremental é o “hammering” (martelamento), processo que consiste na utilização de um conjunto de martelos com vários formatos de matrizes de geometrias simples. Através deste conceito, são fabricadas peças como vasos, potes, castiçais e utensílios artísticos. Essa técnica também é aplicada na indústria automotiva para fabricação de protótipos.

Martelagem é um processo de deformação plástica incremental, sendo o método mais antigo de conformação. Este processo era inicialmente realizado por um martelo e uma bigorna. Com a automatização e a utilização CNC – Comando Numérico Computadorizado, o processo evoluiu, sendo a máquina-ferramenta constituída por braço robótico que na sua extremidade possui um cabeçote com a fixação de um punção (Figura 4).

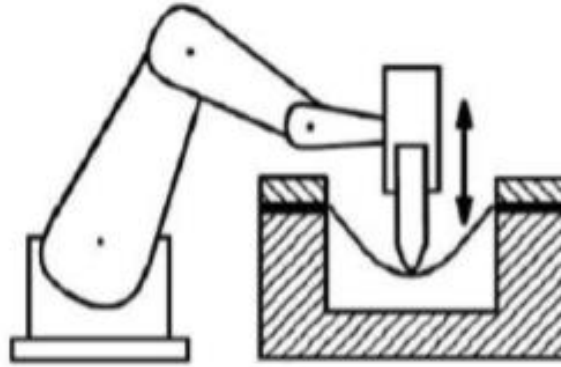


Figura 4: Braço Robótico – Martelagem  
Fonte: SHAFFER, 2004

O princípio do mecanismo ocorre por um movimento linear de translação retilínea uniforme, responsável pela conformação da chapa. Este processo pode ser aplicado em diversos setores da indústria. Tendo como limitações em acabamentos superficiais, dificuldade em deformações de aços de alta resistência e reprodutibilidade dimensional.

O desenvolvimento da tecnologia tem como objetivo atender as necessidades da indústria automobilística, tal tecnologia de estampagem a frio sem o uso de matriz e com o auxílio de Robôs e máquinas CNC (DALEFFE, 2008).

A Estampagem Incremental de chapas é dividida em três, conforme Figura 5:

- a) Estampagem incremental sem matriz;
- b) Estampagem incremental com ferramenta auxiliar;
- c) Estampagem incremental com matriz, sendo que a matriz pode ser parcial ou total.

Sendo que, em todas as opções são necessárias prensa chapa, máquina CNC, dispositivos de fixação e estruturas dedicadas para a realização da conformação (SOEIRO, 2014).

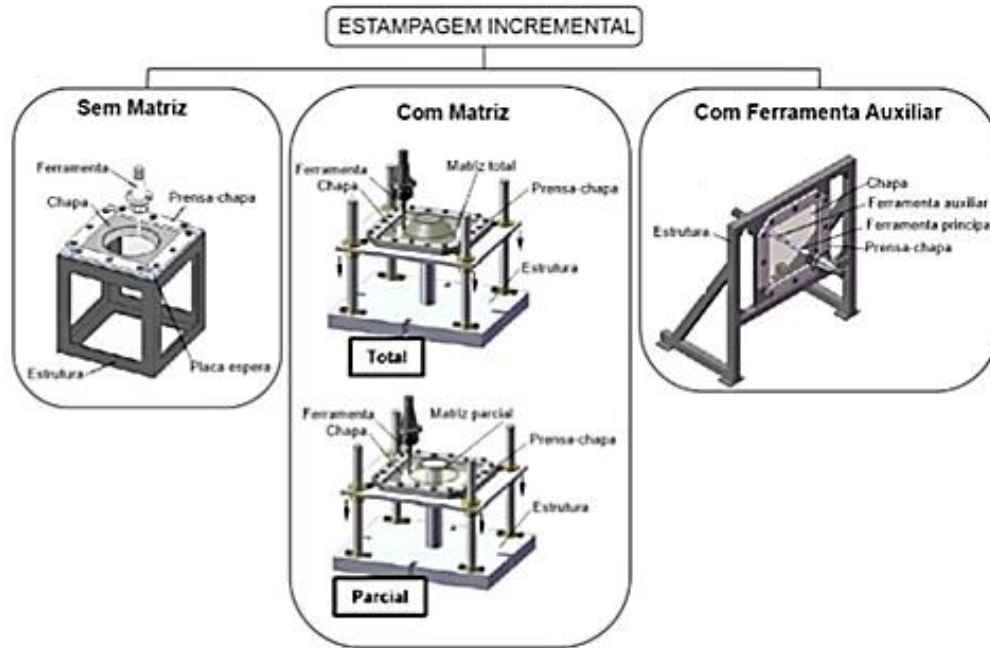


Figura 5: Variantes de Estampagem Incremental  
Fonte: SOEIRO, 2014

Na Estampagem Incremental, a forma e a tolerância do produto final está relacionada com o percurso da ferramenta programada ao caminho a ser seguido durante o processo de conformação, ou seja, o movimento da ferramenta que determina a geometria da peça; sendo que, no processo de estampagem convencional, esse fator está atribuído à precisão da construção da matriz, tanto pelo punção como da cavidade (TIBURI, 2007).

A Figura 6 mostra o ciclo de aplicação da Estampagem Incremental normalmente utilizado para próteses.



Figura 6: Ciclo de Aplicação da Estampagem Incremental  
Fonte: AMBROGIO, 2005 *apud* CASTELAN, 2010

## 2.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Para a realização do processo de Estampagem Incremental é necessário:

- a) Definição do produto a ser conformado – Modelo gráfico – 3D;
- b) Programação da trajetória da ferramenta – Programação em CAD;
- c) Tipo de fixação da chapa a ser conformada;
- d) Equipamento CNC;
- e) Dispositivo.

Em relação ao conhecimento do material a ser comprimido, é preciso ter como princípio o externo a ser utilizado como *blank*, à partir de uma chapa de formato quadrado, retangular ou circular, variando sua espessura de 0,7 mm à 1,5 mm, dependendo da sua aplicação, essa escolha do formato externo do *blank* está relacionado a forma a ser conformada, a chapa é fixada a um dispositivo, que serve como prensa chapa. Essa fixação evita que a chapa se movimente durante o processo de estampagem, assim permitindo que a deformação plástica aconteça.

É necessário um equipamento controlado por um comando, ou seja, um CNC e do modelo matemático em 3D, formato do produto desenhado em um computador CAD e por uma programação de movimento auxiliado por computador CAM, trajetória da ferramenta (FILIPE, 2013).

A deformação da Estampagem Incremental é gerada por uma ferramenta com o seu giro livre ou com rotação em seu eixo árvore de um máquina CNC, que inicia o processo de Estampagem Incremental deslizando sobre a superfície da chapa que, através de incrementos verticais, gradativamente realiza a conformação (MIN *et al.*, 2018).

Os tipos de Estampagem Incremental conforme Figura 7, estão relacionados à quantidade de pontos de apoio e à forma da utilização da matriz (JESWIET *et al.*, 2005):

- a) Estampagem Incremental com ponto simples;
- b) Estampagem Incremental com ponto duplo;
- c) Estampagem Incremental com matriz negativa;
- d) Estampagem Incremental com matriz positiva.

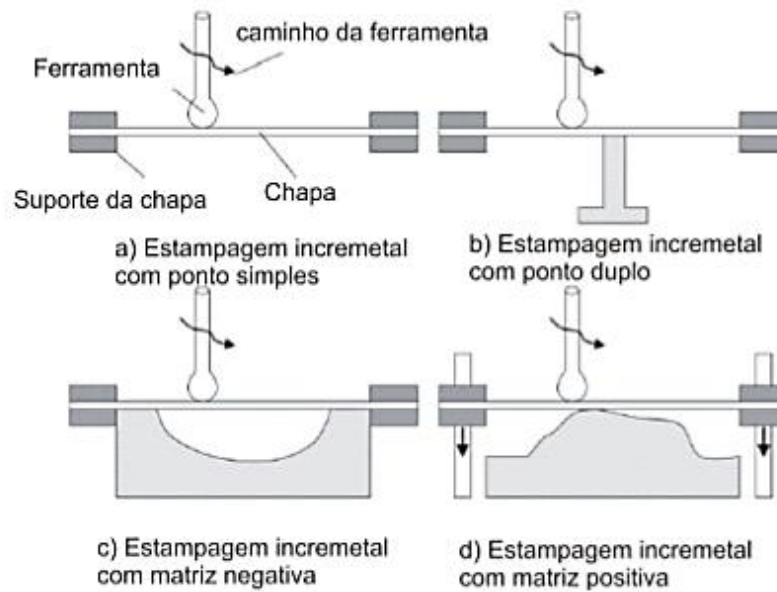


Figura 7: Tipos de Estampagem Incremental  
Fonte: ALLWOOD, 2005

Embora existam equipamentos específicos para Estampagem Incremental, pode-se utilizar máquinas CNC (Centros de Usinagem) como forma manipuladores programáveis em seus movimentos mecânicos para executar a conformação.

Outro método é o de “ponto duplo”, formado por um ponto de apoio conforme Figura 8, colocado no sentido oposto ao da ferramenta que, através de movimentos de interpolações sincronizados ou incremento do eixo vertical (Z) da ferramenta, com movimentos do plano cartesiano, X e Y da mesa do equipamento CNC, dá forma ao produto final (KOPAC; KAMPUS, 2005).

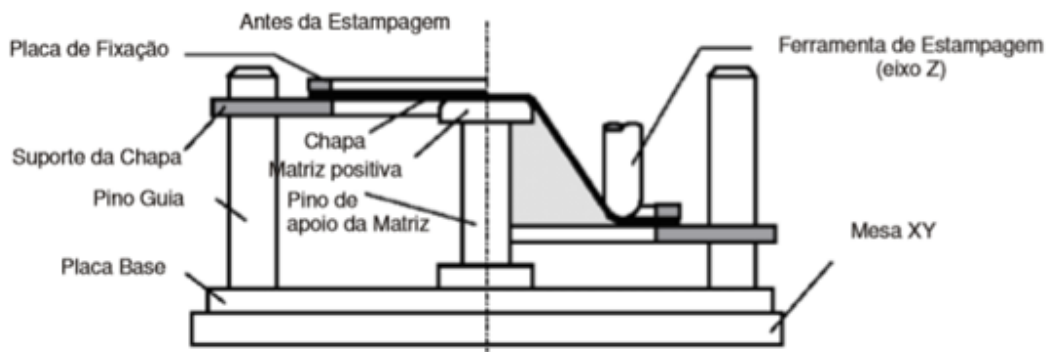


Figura 8: Estampagem Incremental com Ponto de Apoio  
Fonte: HIRT *et al.*, 2005



Na Estampagem Incremental de ponto simples, a ferramenta do eixo Z entra em contato com a superfície interna da chapa produzindo incrementos constantes na cavidade. Com esse método, o perfil da geometria é construído pela trajetória da ferramenta.

Já no processo de Estampagem Incremental com duplo ponto, ou seja, com a matriz positiva, esse dispositivo é colocado abaixo da chapa, com a ferramenta do eixo Z entre a chapa e o dispositivo, assim tendo como responsabilidade o forma final do produto (BAMBACH, 2004).

### 2.3 TIPOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

As variações da Estampagem Incremental se baseiam na quantidade de pontos de apoio ou de ferramentas utilizadas. Além da estampagem de ponto simples, que utiliza uma ferramenta que executa movimentos de translação e rotação, existe a estampagem com uma ferramenta de forma geométrica simples e estacionária, posicionada sob a chapa. Existem ainda os processos que fazem uso e matrizes positivas ou negativas, posicionadas também sob a chapa, que irão dar forma ao produto final (JACKSON; ALLWOOD, 2009).

Nos trabalhos, Castelan (2010) classifica em suas pesquisas que o processo de Estampagem Incremental por múltiplos passes também se inclui como um dos principais tipos.

#### 2.3.1 Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF)

O processo de Estampagem Incremental de Ponto Único, assim representado pela sigla SPIF (*Single Point Incremental Forming*), tem como técnica a estampagem progressiva de uma chapa plana (*blank*) de espessura  $s_0$ , através do incremento vertical, ou seja, penetração da ferramenta de formato cilíndrico com diâmetro em sua ponta esférico  $d_f$ , para conformação da chapa, onde a mesma é apoiada entre o prensa chapas e a placa de apoio, conforme indicado na Figura 9

A distância da prensa chapa determina a região entre a área livre de trabalho e as placas de fixação da chapa, assim a ferramenta de conformação pode

desenvolver seu esforço de estampagem vertical, tendo como característica a parte inferior do dispositivo livre, ou seja, sem matriz abaixo da chapa conformada. Durante o processo de conformação, conforme a ferramenta avança verticalmente no eixo “Z” com velocidade de rotação (rpm) e penetra sobre a chapa, é realizado um incremento de estampagem na peça ( $\Delta z$ ). Nessa estratégia de trabalho, o processo de conformação é realizado por diversos incrementos até que a chapa obtenha o formato desejado, sendo as trajetórias da ferramenta normalmente realizadas em um centro de usinagem com Comando Numérico Computadorizado (CNC) (MARTINS *et al.*, 2008).

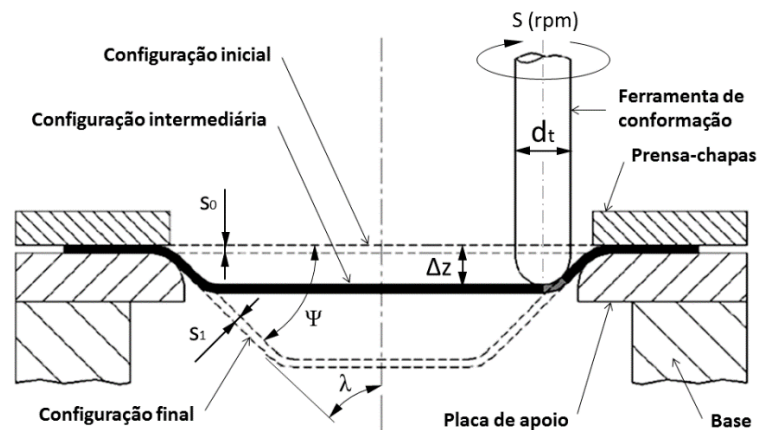


Figura 9: Representação Esquemática de SPIF  
Fonte: Adaptado de MARTINS, 2008

Durante o processo de Estampagem Incremental, a ferramenta pressiona, através do eixo “Z”, a chapa pelo incremento vertical formando o ângulo  $\psi$  com o eixo horizontal e o ângulo  $\lambda$  com o eixo vertical. Podendo ter como análise que, conforme maior o ângulo  $\psi$  menor será o ângulo  $\lambda$  e, por consequência, menor será a espessura da parede da peça conformada pelo processo de estampagem ( $s_1$ ).

A qualidade do produto final na Estampagem Incremental é influenciada pelos seguintes parâmetros:

- A rotação (N);
- O incremento vertical ( $\Delta z$ );
- O avanço (a);
- O diâmetro da ferramenta (df);
- O lubrificante utilizado.

Para obter um atrito menor, uma força aplica baixa entre a ferramenta e o produto estampado no processo de Estampagem Incremental, a rotação livre do eixo árvore, ou seja, sem rotação é permitido esse resultado.

Outros parâmetros que permitem uma combinação para um resultado de menores esforços são diâmetros menores de ferramenta com incrementos verticais maiores que também fazem diminuir a força de estampagem (CENTENO *et al.*, 2014).

Segundo Hamilton e Jeswiet (2010), o processo de Estampagem Incremental aplicando valores altos de avanço e com rotações do eixo árvore altos não representam influencia no acabamento da superfície (rugosidade) dos produtos estampados. Mas os parâmetros de incrementos verticais menores melhoram a rugosidade superficial da chapa e também permitem uma maior estampabilidade do produto final.

A conformabilidade do produto está relacionada à temperatura da chapa, sendo que quando utilizado rotações elevadas, o atrito da ferramenta com a chapa proporciona uma melhor conformação (PALUMBO; BRANDIZZI, 2012).

Em relação ao diâmetro da ferramenta, notasse que conforme for aumentando seu diâmetro, o acabamento superficial da peça vai melhorando, ou seja, menor a rugosidade superficial da chapa estampada (BHATTACHARYA; MANEESH; CAO, 2011).

Segundo estudo de Al-Ghamdi e Hussain (2015), no processo de Estampagem Incremental, foi definido para a ferramenta um diâmetro limite. Nessa análise se percebeu que o diâmetro da ferramenta tem grande influência na estampabilidade da chapa durante o processo de Estampagem Incremental, e que a escolha do diâmetro não influencia na determinação do material a ser estampado ou as características mecânicas do mesmo, mas o que tem grande importância e define o processo pelos seus parâmetros é a espessura do produto a ser conformado, com essa análise foi determinado uma relação do raio crítico da ferramenta com a ângulo máximo da parede, para uma melhor estampabilidade, tendo a equação 01 estabelecendo esta relação, onde  $R_c$  é o raio crítico da ferramenta e  $s_0$  é a espessura inicial da chapa.

$$R_c \approx 2,2 \times S_0 \quad (01)$$

Conforme essa proporção não é respeitada, o processo de Estampagem Incremental passa a correr o risco de trincas na chapa.

A lubrificação no processo de Estampagem Incremental, tem grande importância no acabamento superficial do produto final, segundo o estudo de Azevedo *et al.* (2015), que analisou a qualidade superficial das peças de alumínio AA1050 e aço DP780 através do processo SPIF e definiu que quanto maior a dureza da chapa a ser estampada, menor a viscosidade do lubrificante.

### **2.3.2 Estampagem incremental (TPIF)**

A Estampagem incremental por Dois Pontos, assim representada pela sigla TPIF, é constituída por uma ferramenta de conformação e uma base na parte inferior servindo como apoio na para a chapa, tendo assim como resultado um processo de conformação com melhor qualidade de conformação e ótima precisão dimensional no produto final.

Este processo de conformação de chapas através do TPIF pode ser determinado por:

- a) TPIF Matriz positiva: Este processo, conforme a chapa sofre a conformação mecânica, através da pressão exercida pela ferramenta, o prensa chapas se desloca através de colunas e buchas guia, que deslizam no dispositivo de fixação. É importante salientar que a matriz positiva precisa ter o mesmo perfil da parte interna da peça a ser conformada, essa matriz recebe uma força exercida pela ferramenta durante o processo de conformação Castelan (2010), assim representado pela na Figura 10(a) que indica a situação inicial do processo e na Figura 10(b) que indica a situação final do processo.

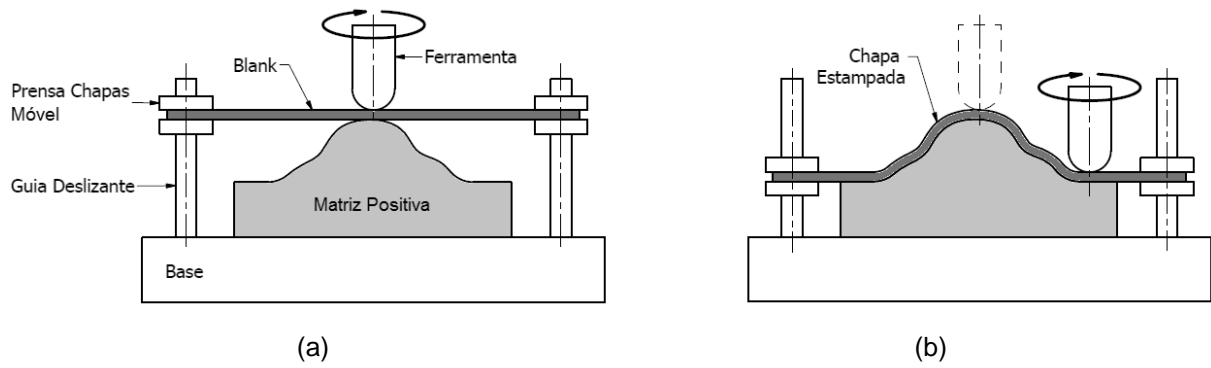


Figura 10: TPIF com Matriz Positiva na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b)  
Fonte: Adaptado de CASTELAN, 2010

b) TPIF Matriz Negativa: Já nesse caso a matriz possui o perfil da parte externa da peça, no entanto, neste processo com matriz negativa que possui perfil da peça não há necessidade de utilizar Guias Deslizantes, assim, apenas utilizando o apoio por prensa, representado pela Figura 11(a) que indica a situação inicial do processo e na Figura 11(a) que indica a situação final do processo (CASTELAN, 2010).

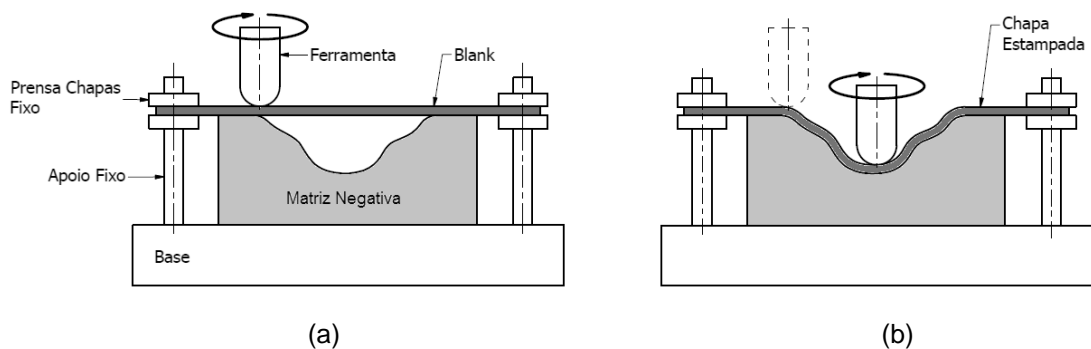


Figura 11: TPIF com Matriz Negativa na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b)  
Fonte: Adaptado de CASTELAN, 2010

O melhor processo de estampagem TPIF é o com Matriz Positiva, comparado ao de Matriz Negativa, pois o mesmo apresenta resultados no momento da conformação, onde a ferramenta apresenta menor força no momento da estampagem, assim gerando baixas tensões residuais na chapa e por fim menor retorno elástico, apesar de que processo TPIF com Matriz Positiva exigir ferramental de maior complexidade (ARAGHI *et al.*, 2009).

c) TPIF Apoio Fixo Genérico: Parte de princípio de um apoio parcial assim determinado por matriz, durante o processo de conformação, conforme a

ferramenta incrementa sobre a chapa, ocorre o deslocamento do prensa chapas através das guias deslizantes do dispositivo de fixação, esse processo é igual ou de Matriz Positiva, tendo a diferença que a matriz, o ponto fixo tem um perfil genérico. A força de apoio à medida que a ferramenta executa a conformação e também auxilia na determinação do perfil geométrico final da Chapa Estampada (MAXIMILIANO, 2016), conforme indicado na Figura 12(a) que apresenta a situação inicial do processo e a Figura 12(b) que apresenta a situação final.

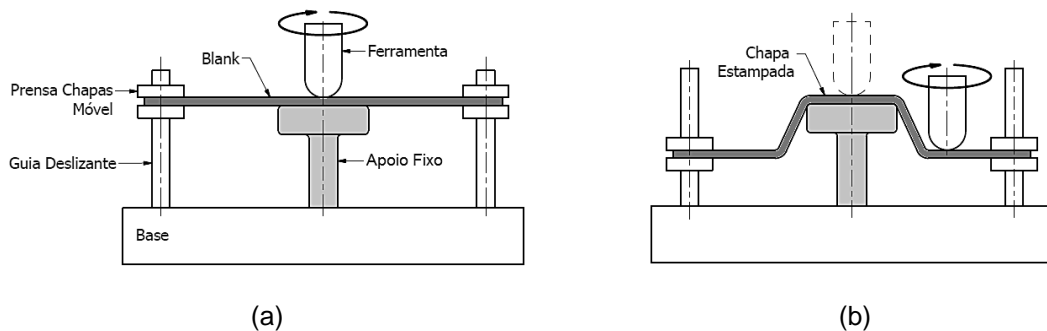


Figura 12: TPIF com Apoio Genérico Fixo na Situação Inicial (a) e na Situação Final (b)  
Fonte: MAXIMILIANO, 2016

Neste processo de conformação a matriz não possui o perfil da peça a ser conformada, sendo assim tanto o custo como a fabricação do apoio se tornam mais viáveis, comparado ao processo de conformação de Matriz Positiva, como sua construção é mais simples, também impacta na qualidade final da peça estampa, assim tendo uma menor precisão dimensional, pois o apoio é em apenas uma região central e não atinge toda a extensão do produto a ser estampado.

- d) TPIF Apoio Móvel Genérico: Esse processo é realizado com prensa chapas fixo, com a auxílio de um o apoio móvel que possui movimentos de deslocamento acompanhando a ferramenta de conformação por toda a área de estampagem, sendo uma oposta da outra, assim tendo um resultado de alta precisão e qualidade superficial no produto estampado se comparado ao TPIF de apoio fixo que não exige a fabricação de uma matriz de apoio, permite que esse método de conformação permita uma flexibilidade maior na preparação e variedade nos formatos a serem conformados.

Um exemplo de conformação de TPIF com apoio genérico móvel utilizado na indústria, assim denominados pelos robôs industriais, conforme indicado na Figura 13(a). Neste processo, enquanto um robô conduz a ferramenta de conformação, o

outro robô, de forma sincronizada, conduz o apoio móvel, conforme indicado na Figura 13(b) (MEIER; MAGNUS; SMUKALA, 2011).

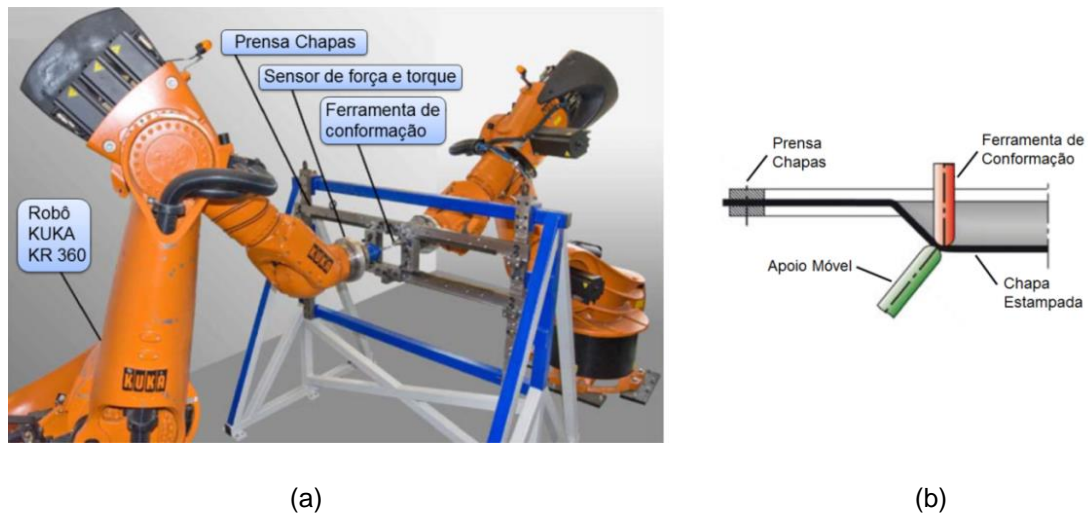


Figura 13: TPIF com Apoio Genérico Móvel utilizando robôs (a) e detalhe ampliado do processo (b)  
Fonte: MEIER, MAGNUS, SMUKALA, 2011

A grande vantagem dos braços robóticos industriais é que os mesmos permitem que os movimentos da ferramenta de conformação se desloquem em seis eixos de movimento, coisa que não é permitido em centros de usinagem convencionais, devido os CNC terem apenas três eixos controlados, sendo assim esse processo permite uma grande flexibilidade e variedade de formas a serem conformadas, abrangendo perfis extremamente complexos de rápida preparação para o início do trabalho.

### 2.3.3 Estampagem Incremental por Múltiplos Passes

A Estampagem Incremental de Ponto Único por Múltiplos Passes, também representada pela sigla MSPIF (*Multi Single Point Incremental Forming*), possui um método de trabalho que se desenvolve pela estampagem de perfis e ângulos intermediários, com o objetivo de obter maior estampabilidade do produto final com maior ângulo de parede (DUFLOU *et al.*, 2008b).

Conforme a Figura 14, é possível entender a forma do processo de conformação MSPIF, onde no primeiro estágio é aplicado um incremento na ferramenta com ângulo de parede inicial ( $\psi'$ ) a fim de se obter um perfil intermediário diferente do perfil final. Em seguida são aplicados novos incrementos a fim de se

obter no quarto estágio o perfil desejado e o ângulo final de parede ( $\psi$ ). No final do processo percebe-se que a espessura final ( $s_1$ ) é menor que a espessura inicial ( $s_0$ ). Conseqüentemente o encruamento da chapa aumenta a cada passe, bem como a força necessária para realização da estampagem, conforme indicado no detalhe A da Figura 14 (CASTELAN, 2010).

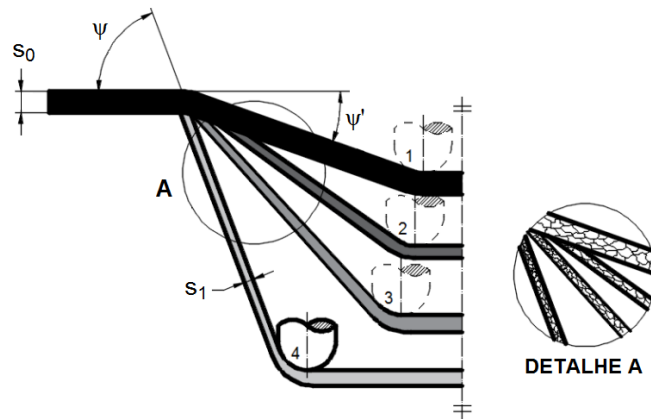


Figura 14: Processo MSPIF e o efeito de encruamento da chapa a cada passe  
Fonte: Adaptado de CASTELAN, 2010

Na conformação pelo processo de Estampagem Incremental a estampabilidade das peças pode atingir resultados melhores se utilizar ângulos maiores das paredes, assim realizados por passes múltiplos definidos por perfis intermediários, alternando a trajetória da ferramenta em movimentos descendentes e ascendentes (HIRT *et al.*, 2004).

## 2.4 LIMITAÇÃO PELA GEOMETRIA DA PEÇA

Em publicações, Kopac e Kampus (2005) *apud* Silva (2011) descrevem que como em outros processos de conformação (forjamento e 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°. Ultrapassando este valor, se torna muito frequente a ruptura ou, no mínimo, uma diminuição drástica da espessura da chapa, causando uma baixa resistência mecânica localizada.

O ângulo da superfície da chapa deformada é também importante na conformação incremental assimétrica. Um dos pontos que se deve ter em atenção ao conceber a peça no *software* CAD é a obrigatoriedade do ângulo de parede da



peça desenhada ser inferior ao ângulo de conformação permitido pelas características do material da chapa durante a deformação (JESWIET, 2005 *apud* SENA, 2009).

A constância de volume conduz a uma relação direta entre a espessura da parede e o ângulo de parede indicado na Figura 15, o qual tem sido comumente referenciado como “lei do seno” e que leva a um afinamento extremo da chapa ou falha no caso de aplicações de grandes ângulos em um único passe (JUNK *et al.*, 2003 *apud* SILVA, 2011).

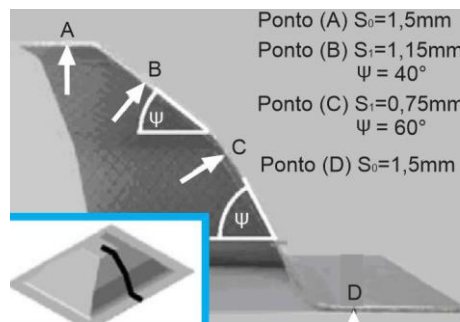


Figura 15: Redução da espessura de parede  
 Fonte: JUNK *et al.*, 2003, *apud* SILVA, 2011

O ângulo máximo de estampagem é determinado por uma relação entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação, que é expresso pela equação matemática chamada de lei dos senos (ARAGHI *et al.*, 2011), conforme representado na Equação 2 a seguir:

$$s_1 = s_0 \cdot \text{sen} (90 - \psi) \quad (2)$$

Onde:

$\Psi$  = inclinação da parede de chapa ( $^\circ$ );

$s_0$  = espessura do blank (mm);

$s_1$  = espessura final da chapa (mm).

O cálculo que segue, refere-se à indicação mostrada na Figura 15 para o ângulo de inclinação da parede ( $\psi$ ) de  $70^\circ$  e espessura original da chapa de 1,2 mm.

$$s_1 = 1,2 * \text{sen} (90 - 70)$$

$$s_1 = 1,2 * \text{sen} 20^\circ$$

$$s_1 = 1,2 * 0,342$$

$$s_1 = 0,41\text{mm}$$

Entretanto, a lei de senos não prevê como ocorre a variação de espessura ao longo de processo de estampagem.

O comportamento da chapa em relação ao ângulo de inclinação da parede (65°) e sua relação com a diminuição de espessura estão mostrados na Figura 16. O ângulo de 45° é uma inclinação que a maioria dos materiais pode ser conformada, sem que ocorra um afinamento extremo na chapa. Já os ângulos de parede próximos a 90°, considerando um único estagiam de estampagem, tendem a produzir seções extremamente finas, que obviamente constituem um problema a ser evitado (KOPAC; KAMPUS, 2005 *apud* SILVA, 2011).

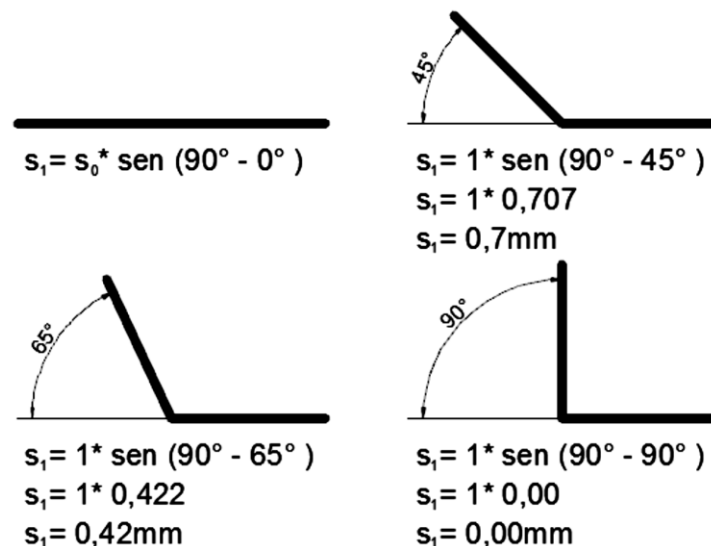


Figura 16: Relação entre o ângulo de parede e a espessura da chapa no processo de Estampagem Incremental  
Fonte: SILVA, 2011

Limitações de geometria aplicados em formas complexas de estampagem convencional possibilitaram estudos para o desenvolvimento novos processos possibilitando ângulos finais de conformação maiores que 65°.

Hussain *et al.* (2009) *apud* Silva (2011) em pesquisas realizadas sobre o limite de conformação das chapas de alumínio utilizadas na indústria automobilística, foram avaliados dois parâmetros: limite de espessura (*thinning limit*) e o ângulo limite de estampagem (*forming angle limit*). Através da análise dos resultados, constatou-se que variando a inclinação da chapa ao longo da profundidade consegue-se uma maior capacidade de estampagem do que se utilizando uma inclinação constante.

A Figura 17 apontada nos trabalhos de Hussain *et al.* (2007) demonstra um teste de estampagem onde o ângulo de parede ( $\Psi$ ) aumentou gradativamente a medida que a profundidade de estampagem também aumentava. Assim, foi observada a profundidade de ruptura, a profundidade atingida e a profundidade projetada de acordo com o modelo CAD da peça. A partir do menor diâmetro o ângulo de parede ficou próximo de  $90^\circ$ , o que causou o rompimento da chapa. A diferença entre a profundidade atingida e a projetada foi ocasionada pelo retorno elástico do material, comum em operações de estampagem.

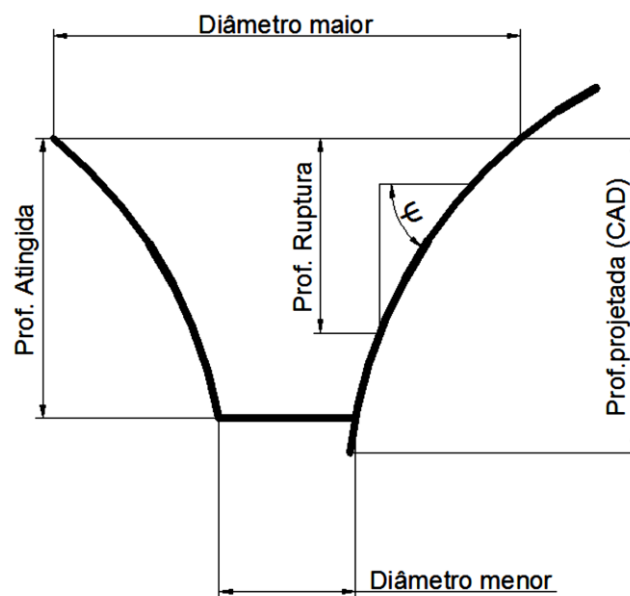


Figura 17: Variação da inclinação da chapa  
Fonte: HUSSAIN *et al.*, 2007

Uma característica presente nos processos de estampagem em geral que acontece na ISF e que determina limites de qualidade geométrica é o retorno elástico. Além da deformação plástica programada, a deformação elástica produz discrepâncias geométricas entre o produto final e seu modelo correspondente em CAD (SILVA, 2011).

A utilização do Método de Elementos Finitos (*Finite Elements Method – FEM*) auxilia no desenvolvimento de um algoritmo de correção da malha que vem a diminuir ou excluir totalmente o desvio, que é gerado pelo retorno elástico da peça, entre o teórico e o real. Esse algoritmo de correção recebe dados de uma máquina de medir por coordenadas, que é utilizada para medir a primeira peça produzida do lote. Esses dados são comparados com os dados geométricos do modelo em CAD 3D e então é feito o ajuste de coordenadas, gerando uma nova malha (superfície)

corrigida. Estando em um ambiente paramétrico, o software de CAM atualiza automaticamente os dados de trajetória das ferramentas. Um novo arquivo NC (*Numerical control*) é gerado e uma peça subsequente é produzida, já com as devidas atualizações (DUFLOU *et al.*, 2005).

Meier *et al.* (2009) *apud* Marabuto (2010) apresentou um sistema de correção em malha fechada de trajetórias de conformação que consiste em fazer um levantamento em tempo real da superfície a ser gerada por Estampagem Incremental e calcular os desvios face ao modelo CAD. Os dados são introduzidos num algoritmo de correção e novamente calculados os desvios para a interação seguinte, até que o erro entre a superfície real e o modelo CAD esteja dentro da tolerância pretendida. A Figura 18 representa um diagrama de correção de desvios.

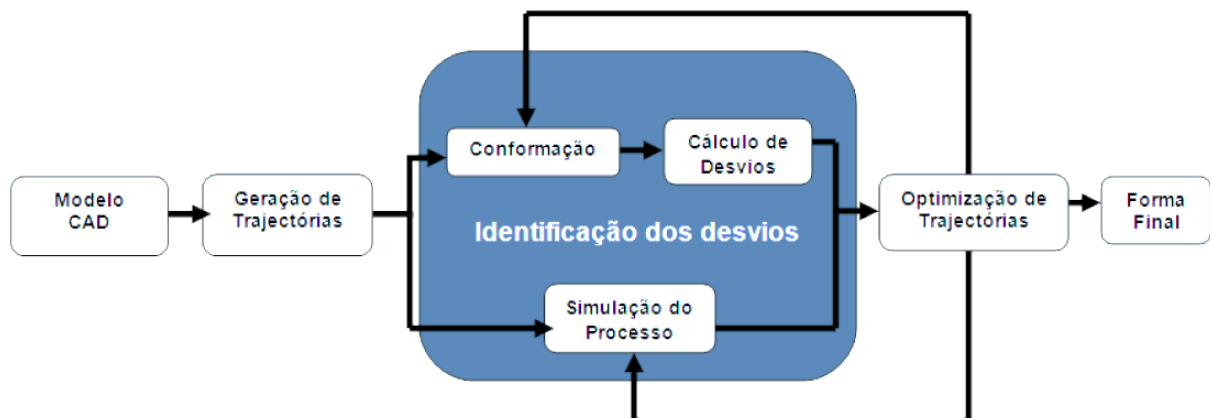


Figura 18: Diagrama de correção de desvios  
Fonte: MEIER *et al.*, 2009

## 2.5 VELOCIDADE DA FERRAMENTA DE CONFORMAÇÃO

O calor gerado durante o processo de deformação é resultante do atrito, quando a ferramenta se desloca sobre a superfície de trabalho com um determinado avanço ( $a$ ) e rotação ( $N$ ). Controlando estas variáveis, controla-se o calor formado na interface de contato entre a ferramenta e a superfície da chapa durante a conformação do componente.

Ao deslocar-se sobre a superfície da chapa a uma elevada rotação, a ferramenta está em escorregamento, gerando calor por fricção. O movimento relativo da ferramenta sobre a chapa é inversamente proporcional ao calor gerado pela fricção resultante do escorregamento. Se o movimento relativo entre a ferramenta e

a superfície de trabalho durante a conformação for elevado, o calor gerado é inversamente proporcional à velocidade da ferramenta (JESWIET *et al.*, 2005).

No caso de ser utilizada uma esfera de movimento livre na extremidade da ferramenta de conformação, como ilustrado na Figura 19, o contato sobre a superfície da chapa ocorre por rolamento e não por escorregamento, deste modo o calor gerado na interface diminui.

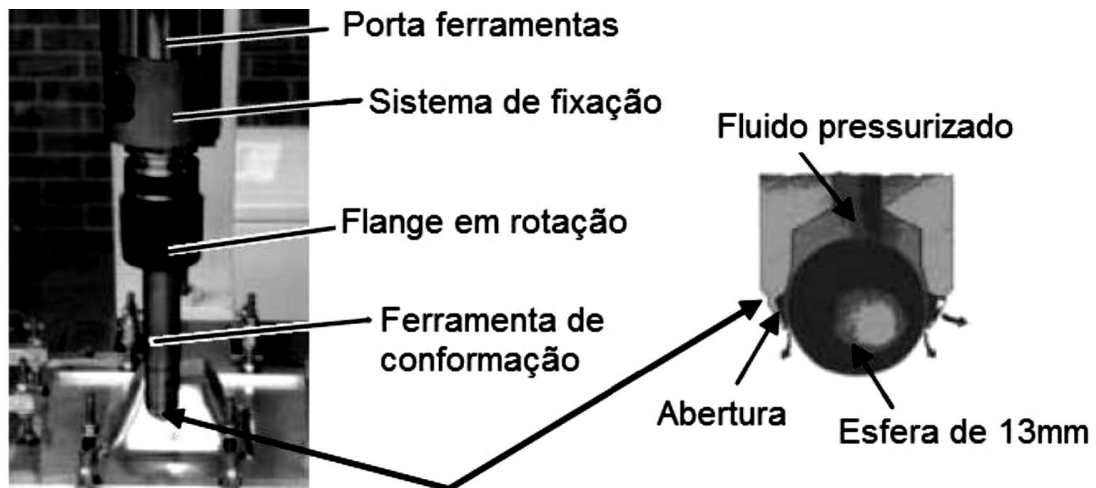


Figura 19: Ferramenta de conformação com ponta esférica de movimento "livre"  
 Fonte: JESWIET *et al.*, 2005

O aumento da velocidade angular da ferramenta pode favorecer a deformação da chapa por aquecimento local na zona de contato entre a chapa e a ferramenta, devido ao atrito existente entre as interfaces. O aspecto negativo do aumento da velocidade de rotação da ferramenta de conformação é a necessidade de aplicar mais lubrificante, pelo fato de este se danificar rapidamente devido ao calor gerado por atrito. Quanto mais deformável é o material, menor pode ser a velocidade rotacional da ferramenta (HAM; JESWIET, 2006).

O aumento da velocidade translacional relativa da ferramenta sobre a superfície de trabalho da chapa deteriora a qualidade superficial do componente em fabricação.

A velocidade da ferramenta de conformação também está diretamente relacionada com o tempo e custo de produção do componente, ou seja, quanto maior o tempo para produzir a peça mais cara esta fica, no entanto a qualidade superficial do produto final é superior.

## 2.6 FERRAMENTA DE CONFORMAÇÃO

Para selecionar a ferramenta de conformação mais indicada, é necessário encontrar o diâmetro ótimo para a esfera da ferramenta, sendo essencial conhecer a geometria a conformar na chapa, o tipo de material, e a que profundidade a esfera na extremidade da ferramenta em movimento vai trabalhar. Na Estampagem Incremental por ponto único são normalmente usadas ferramentas de ponta esférica sólida, como na Figura 20.



Figura 20: Ferramentas com extremidade esférica sólida de conformação  
Fonte: VIHTONEN; TUOMI, 2007

Para o ângulo de inclinação ( $\alpha$ ) da parede do componente, existe um ponto a partir do qual o diâmetro de contato da ferramenta com a chapa é máximo e corresponde ao instante em que o contato da chapa em deformação nesse ponto é tangente à superfície da esfera da ferramenta. A Figura 21 ilustra o contato limite tangencial para duas tipologias de ferramentas diferentes.

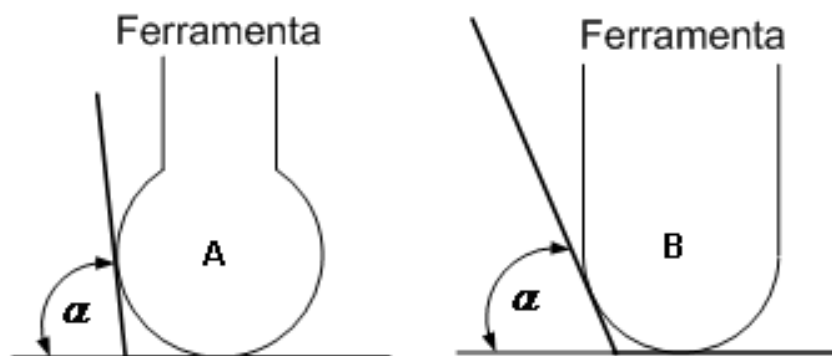


Figura 21: Contato da parede da chapa com a ferramenta de conformação.

Fonte: SENA, 2009

Quando o ângulo das paredes da chapa em conformação é muito acentuado, é necessário que a ponta esférica da ferramenta tenha um diâmetro superior ao diâmetro de suporte desta com o intuito de evitar o contato entre o suporte da ponta esférica e a chapa.

Existe uma gama variada de diâmetros para a esfera localizada na ponta da ferramenta de conformação, valores de diâmetro que podem ir dos 6 mm até aos 100 mm, este último usado na fabricação de peças de grandes dimensões. Normalmente os valores de diâmetro da ponta esférica usados são de 4 mm a 15 mm (VIHTONEN, TUOMI, 2007). O diâmetro a utilizar depende do ângulo côncavo requerido para formar a peça e influencia a qualidade superficial como também o tempo de fabricação.

Selecionada a ferramenta de estampar, com uma ponta esférica com determinado diâmetro específico consoante à aplicação, também é necessário ter em consideração o material desta. Na maioria dos casos, a ponta esférica é fabricada em aço, o que é satisfatório para a maioria das aplicações. No entanto, para reduzir a fricção e aumentar a vida útil da ferramenta, esta pode ser coberta superficialmente por outros materiais, à base de carbonetos. Em algumas aplicações é necessária a utilização de uma ferramenta de ponta esférica em material polimérico, como a Figura 22, para evitar a formação de substâncias químicas ou reações com o material da chapa em conformação, de modo a peça final obter melhor qualidade superficial.



Figura 22: Ferramentas de conformação de ponta esférica sólida com 6, 10 e 30mm de diâmetro e com ponta de plástico (direita)

Fonte: JESWIET *et al*, 2005

Quando o acabamento e qualidade superficial são prioritários, a velocidade de deslocamento e o incremento da ferramenta devem ter um controle mais exigente ou então a ferramenta pode ser especificamente projetada para o efeito. Neste caso em particular, a ferramenta consiste numa esfera suportada por um fluido pressurizado, permitindo que a esfera gire livremente sobre a superfície de trabalho em todas as direções, diminuindo a fricção entre a ferramenta e a chapa.

O diâmetro da esfera na extremidade da ferramenta de conformação desempenha um papel importante, onde um pequeno diâmetro concentra as tensões locais na zona de deformação da chapa.

A Figura 23 mostra o comportamento do ângulo da parede da peça em alumínio AA 3003-O em função do aumento do diâmetro da esfera na extremidade da ferramenta, através de resultados obtidos por Ham e Jeswiet (2006).

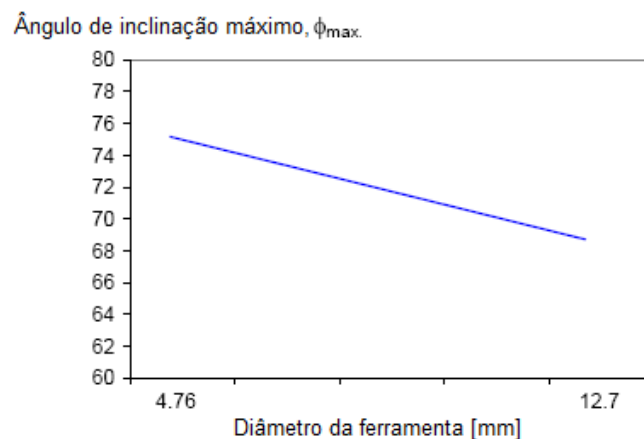


Figura 23: Influência do diâmetro da ferramenta no ângulo máximo da parede  
Fonte: HAM; JESWIET, 2006

Resultados obtidos por Hirt *et al* (2004) na conformação de pirâmides com bases quadrangulares com declives variados mostram que com a diminuição do diâmetro da ferramenta de 30 mm para 6 mm podem ser alcançadas maiores deformações para o mesmo material da chapa, como representado no diagrama das conformações da Figura 24.



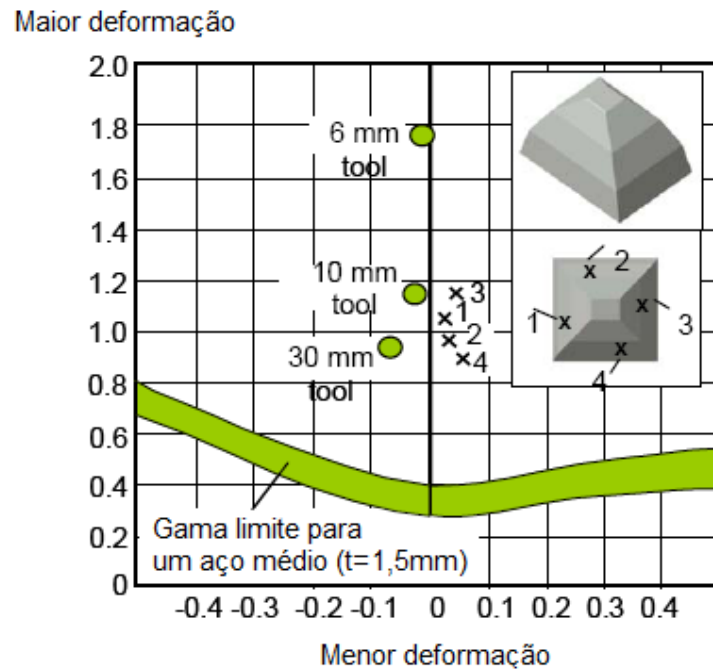


Figura 24: Comparação entre vários diâmetros de ferramenta no diagrama limite de conformação  
 Fonte: HIRT *et al*, 2004.

O aumento do ângulo máximo da parede da chapa com a diminuição do diâmetro da ferramenta de conformação é causado pela concentração da força numa menor área, conjugado com a geração de calor devido ao atrito entre superfícies. A condição que limita a diminuição do diâmetro é o fato de ser propícia a ocorrência de trinca por fadiga da ferramenta.

## 2.7 LUBRIFICAÇÃO

Um dos fatores com mais referência nos processos de estampagem é a lubrificação (NAWI; MAHDAVIAN, 1994). Exercendo uma função de extrema importância no processo de Estampagem Incremental conforme figura 25, contribuindo nos seguintes fatores:

- Diminuir o aquecimento da ferramenta e da peça;
- Apresenta a minimização do esforço de trabalho da ferramenta em relação a peça;
- Baixo coeficiente de atrito entre ferramenta e a peça;
- Apresenta um melhor acabamento superficial no produto;
- Baixo nível de desgaste da ferramenta durante o processo de estampagem.

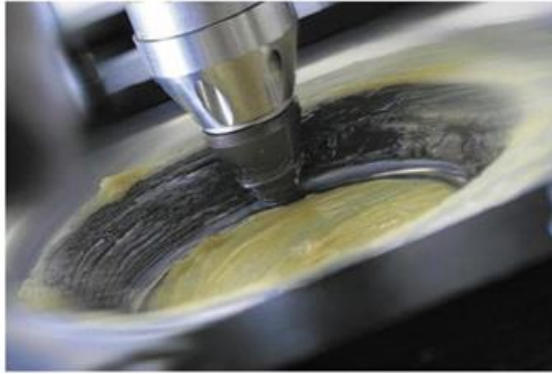


Figura 25: Ferramenta utilizando como lubrificante graxa convencional

Fonte: JACKSON; ALLWOOD, 2009

Segundo Reagan e Smith (1991), neste processo há diversas maneiras para aplicar a lubrificação, mas todas relacionadas ao tipo de material e à temperatura em que o processo está inserido.

Os principais lubrificantes tradicionalmente utilizados são:

- a) Sebo de velas;
- b) Sebo misturado com óleo;
- c) Sabão misturado com óleo.

O lubrificante sebo de vela está pronto para aplicação no material a ser estampado, já os outros dois tipos de lubrificante (sebo misturado com óleo e sabão misturado com óleo) é necessária sua preparação de forma manual antes de sua aplicação. Sua aplicação deve ser contínua e em pequenas quantidades, sendo que é necessário observar que quanto mais o lubrificante permanecer na superfície da chapa, mais eficiente é a ação do lubrificante referência.

O estudo de Nawi e Mahdavian (1994) apresenta que a lubrificação é importante para manter as características técnicas no produto final mantendo seu dimensional, assim respeitando a tolerância e além disso mantendo um bom acabamento visual e superficial, melhorando a rugosidade do produto e minimizando as forças na estampagem.

A análise do lubrificante parte do princípio de sua aplicação em todas as faces das chapas que acontecerá a estampagem, analisando as diferentes hipóteses da viscosidade dos três tipos de lubrificantes, assim percebendo que conforme aumenta a viscosidade do lubrificante, existe a diminuição da força de estampagem durante o processo de estampagem.

Segundo Tiburi (2007), para a redução do aquecimento entre a chapa e a ferramenta de estampagem, o principal motivo era a redução do atrito com a utilização de lubrificante a base de lítio utilizando uma graxa para rolamentos.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Os experimentos de Estampagem Incremental foram realizados em um centro de usinagem CNC da marca ROMI modelo Discovery 308, com curso longitudinal de

450 mm, curso transversal de 310 mm e curso vertical de 410 mm. A estampagem foi realizada em chapas de Alumínio AA1200 H14 com dimensões 1 x 60 x160 mm, através de um dispositivo constituído por uma matriz parcial, sobre a qual foi fixada cada chapa por meio do prensa chapas, conforme indicado na Figura 26.

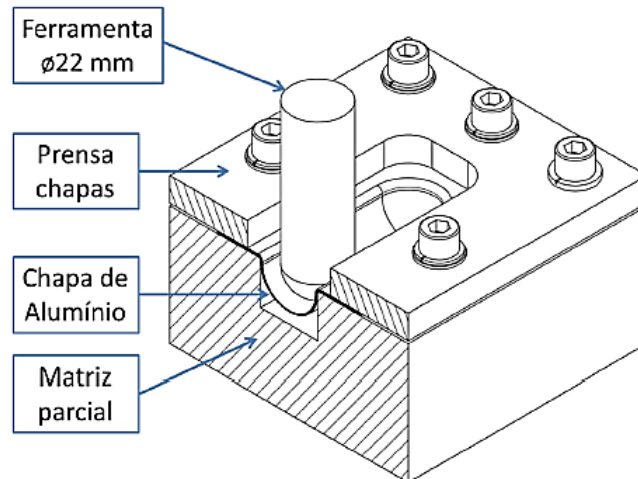


Figura 26: Dispositivo para realização dos experimentos de Estampagem Incremental

A conformação das chapas foi realizada por duas ferramentas de Estampagem Incremental com ponta semiesférica, a primeira com diâmetro  $d_f = 3/8''$  e a segunda com diâmetro  $d_f = 7/8''$ , ambas fabricadas em aço rápido, conforme indicado na Figura 27.

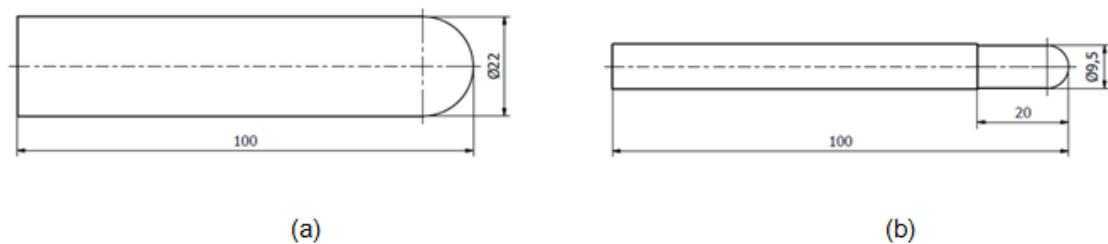


Figura 27: (a) Ferramenta  $\text{Ø } 3/8''$  e (b) Ferramenta  $\text{Ø } 7/8''$

Para realização de cada experimento foi determinado o percurso da ferramenta de estampagem por programação CNC, com incremento vertical de 0,5 mm sobre a chapa (no eixo Z). Após cada incremento vertical ocorre um deslocamento da ferramenta em 100 mm (no eixo X) e outro incremento vertical, até que ocorra o surgimento de trinca na chapa, então o experimento é interrompido. A

Figura 28 apresenta o percurso da ferramenta em cada experimento de Estampagem Incremental.

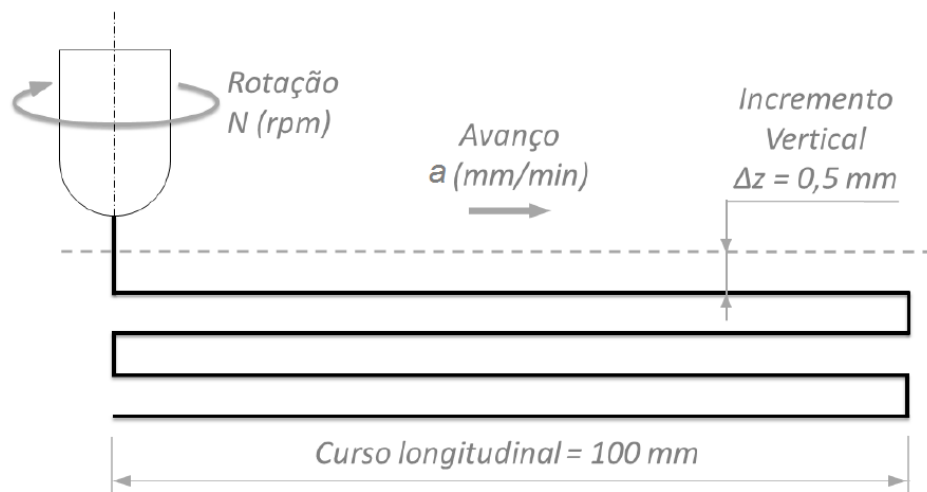


Figura 28: Percurso da ferramenta nos experimentos

Foram realizados 12 experimentos com cada ferramenta, variando os parâmetros de avanço e rotação, A rotação variou entre 0 rpm, (com eixo livre), 200 rpm, 400 rpm e 800 rpm, e o avanço variou entre 200 mm/min, 400 mm/min e 800 mm/min.

A escolha da graxa foi orientada por Azevedo *et al.* (2015) que na Estampagem Incremental de alumínio obteve bons resultados de rugosidade das chapas com o uso de uma graxa similar (graxa AL-M). Nestes ensaios a lubrificação foi realizada por meio de fatores esféricos com bissulfeto de molibdênio - UNILIT MP BSM. Sua aplicação foi feita por meio de pincel, sendo que a cada incremento da ferramenta essa graxa foi reaplicada manualmente à medida que a interface chapa-ferramenta ficava sem lubrificação. A Figura 29a apresenta o processo de Estampagem Incremental sendo realizado no centro de usinagem CNC com ferramenta  $\varnothing 22$  mm e a superfície da chapa devidamente lubrificada, enquanto a Figura 29b apresenta o processo com ferramenta de diâmetro 9,5 mm.

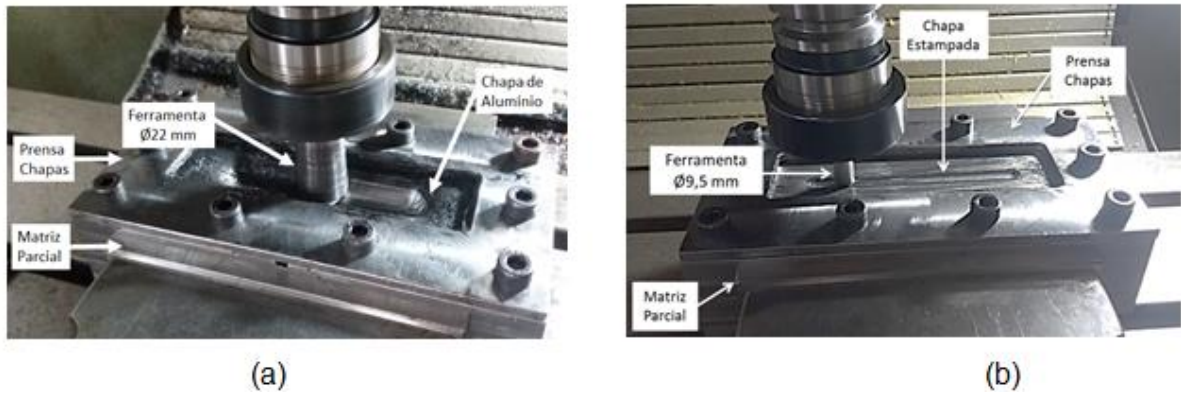


Figura 29: (a) Realização dos experimentos com Ferramenta  $\varnothing 22$  mm e (b) com Ferramenta  $\varnothing 9,5$  mm

Em cada chapa de alumínio foram gravados círculos com 2,5 mm de diâmetro por um processo eletroquímico. Após o surgimento da trinca em cada experimento ocorreu sua interrupção, sendo a medição das deformações máximas realizada nas formas elípticas (geradas pela deformação da chapa) logo ao lado da região onde a trinca ocorreu, conforme indicado na Figura 30.

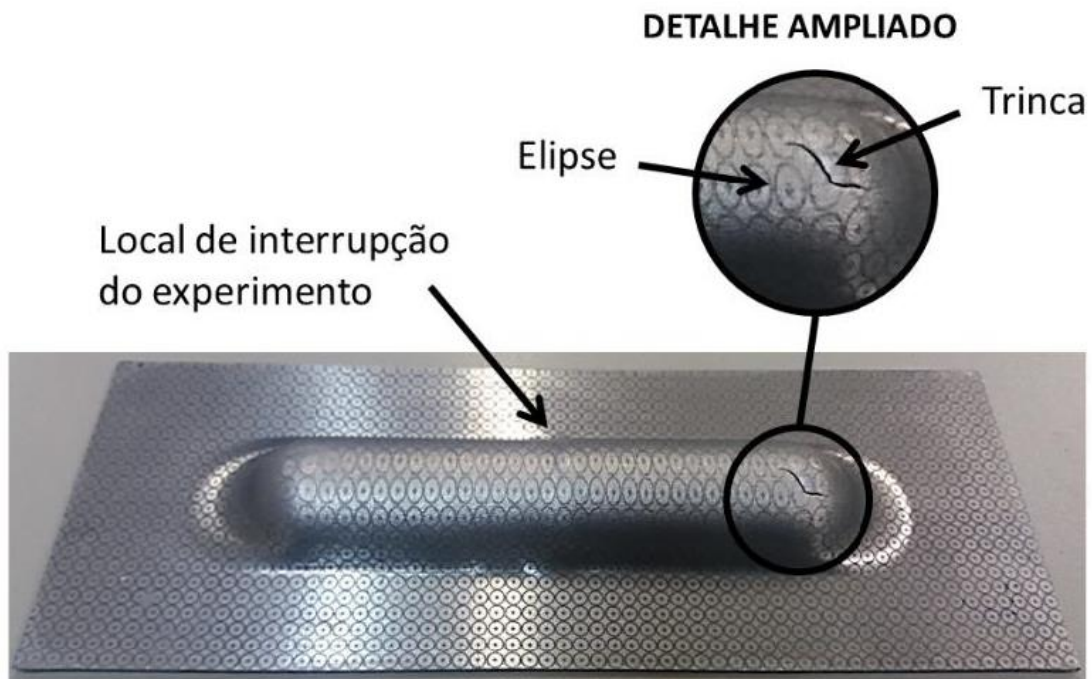


Figura 30: Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200-H14

#### 4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Ao todo foram realizados 24 experimentos, sendo os 12 primeiros realizados com diâmetro 9,5mm e os demais experimentos realizados com diâmetro 22mm, nos quais foram coletados dados de avanço e rotação para estampagem incremental de alumínio puro, a fim de otimizar o processo de fabricação de peças estampadas por essa técnica.

#### 4.1 EXPERIMENTOS COM FERRAMENTA DE DIÂMETRO 9,5 MM

Através da análise dos 12 primeiros experimentos, realizados com ferramenta de diâmetro 9,5 mm, variando os parâmetros de avanço e rotação e mantendo o incremento vertical constante em 0,5 mm, foi construída a Tabela 1. Na Tabela 1 também foram adicionados os resultados de cada experimento, como a profundidade em que ocorreu a trinca  $h_1$ , a espessura final da chapa  $s_1$ , a deformação no comprimento  $\varphi_1$ , a deformação na largura  $\varphi_2$ , e a deformação na espessura  $\varphi_3$ .

Tabela 1: Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200, com  $\Delta z = 0,5$  mm, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm

N°	N (rpm)	a (mm/min)	$h_1$ (mm)	$s_1$ (mm)	$\varphi_1$ (-)	$\varphi_2$ (-)	$\varphi_3$ (-)
1	livre	200	7,0	0,41	0,88	0	-0,88
2	livre	400	7,0	0,41	0,88	0	-0,88
3	livre	800	6,5	0,50	0,69	0	-0,69
4	200	200	7,0	0,41	0,88	0	-0,88
5	200	400	7,0	0,41	0,88	0	-0,88
6	200	800	6,5	0,50	0,69	0	-0,69
7	400	200	7,0	0,41	0,88	0	-0,88
8	400	400	6,5	0,50	0,69	0	-0,69
9	400	800	6,5	0,50	0,69	0	-0,69
10	800	200	8,0	0,38	0,96	0	-0,96
11	800	400	6,5	0,50	0,69	0	-0,69
12	800	800	6,5	0,50	0,69	0	-0,69

A Figura 31 mostra a chapa estampada com redução significativa da espessura inicial ( $s_0$ ) para a espessura final ( $s_1$ ), sendo que cada experimento foi interrompido logo após a apresentação da trinca na chapa, registrando-se a profundidade final ( $h_1$ ) em que ela ocorreu.

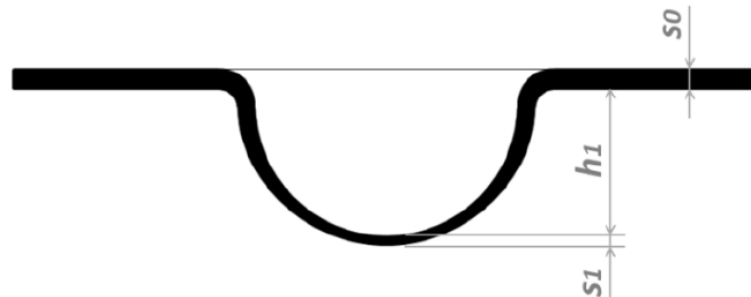


Figura 31: Perfil do canal estampado após ensaios de Estampagem Incremental

A Figura 32 mostra a variação dimensional do círculo gravado nas chapas após a Estampagem Incremental.

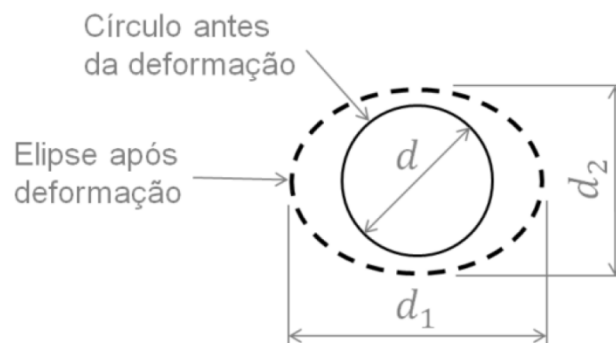


Figura 32: Deformações na chapa estampada

O valor da deformação  $\varphi_1$  foi determinado pela relação entre o comprimento da elipse e o diâmetro do círculo gravado na chapa, conforme Equação 3, enquanto que o valor da deformação  $\varphi_2$  foi determinado pela relação entre a largura da elipse pelo diâmetro do círculo gravado na chapa, conforme Equação 4.

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d} \quad (3)$$

Onde:



$\varphi_1$  = deformação verdadeira no comprimento (-);

$d_1$  = comprimento da elipse - obtida pela deformação do círculo gravado na chapa para análise das deformações (mm);

$d$  = diâmetro do círculo gravado na chapa - para análise das deformações (mm).

$$\varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d} \quad (4)$$

Onde:

$\varphi_2$  = deformação verdadeira na largura (-);

$d_2$  = largura da elipse - obtida pela deformação do círculo gravado na chapa para análise das deformações (mm).

Nos 12 primeiros experimentos a deformação  $\varphi_1$  variou de 0,69 a 0,88 com a deformação  $\varphi_2$  se mantendo em 0, o que caracteriza a deformação plana, medidas ao lado da trinca. A deformação na espessura  $\varphi_3$  foi determinada pela lei da constância de volume, que determina que a variação das deformações é nula, conforme indicado na Equação 5.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (5)$$

Onde:

=  $\varphi_1$  Deformação no comprimento (-);

=  $\varphi_2$  Deformação na largura (-);

=  $\varphi_3$  Deformação na espessura (-).

Conhecendo a deformação na espessura  $\varphi_3$  e o valor da espessura inicial ( $s_0 = 1$  mm), a partir da Equação 6, foi possível calcular a espessura final  $s_1$ , conforme indicado na Equação 7.

$$\varphi_3 = \ln \frac{s_1}{s_0} \quad (6)$$

$$s_1 = e^{\varphi_3} \cdot s_0 \quad (7)$$

A profundidade em que ocorreu a trinca  $h_1$  foi determinada de acordo com a profundidade registrada no painel do centro de usinagem CNC no instante em que cada experimento foi interrompido, variando de 6,5 mm a 8 mm.

Na Figura 33 é apresentada a relação entre rotação (N) e deformação máxima obtida ( $\varphi_1$ ) para cada avanço (a) utilizado nos experimentos.

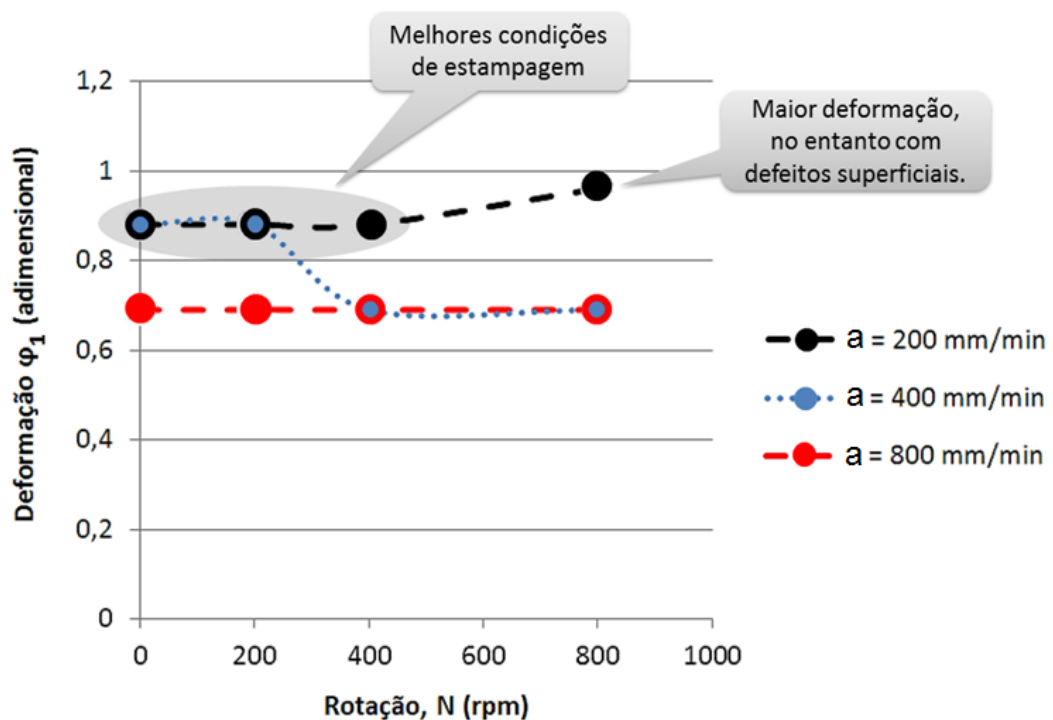


Figura 33: Relação de rotação (N) e deformação ( $\varphi_1$ ) para cada velocidade de avanço (a) nos experimentos de Estampagem Incremental, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm

A Figura 33 indica que quanto menor for a velocidade de avanço, maior será a estampabilidade no processo de Estampagem Incremental, assim como também concluído por Arruda (2010). Já que com avanço  $a = 200$  mm/min foi possível obter os maiores valores de deformação, enquanto que com avanço de  $a = 800$  mm/min, foram obtidas as menores deformações e com  $a = 400$  mm/min deformações intermediárias dependendo da rotação utilizada.

Também se percebe que com baixo valor de avanço (200 mm/min) há aumento na deformação máxima com rotação de 800 rpm, confirmando as conclusões dos estudos de Xu *et al.* (2013) com mesmo incremento vertical e faixa

de avanço próxima, que indicam que, em geral, a estampabilidade aumenta à medida que ocorre aumento da rotação da ferramenta.

No entanto, com avanço de 400 mm/min, a deformação diminui a partir de 400 rpm. Já com avanço de 800 mm/min a variação de rotação não apresenta nenhuma influência na profundidade estampada.

Na Figura 33 ainda é apresentada uma região em destaque onde foram constatadas as melhores condições de Estampagem Incremental, ou seja, onde foi possível obter maior deformação sem que houvesse comprometimento da rugosidade superficial da chapa estampada. Desta região foi excluído o experimento que apresentou maior deformação, pois este também apresentou defeitos superficiais.

A maior deformação ocorreu no 10º experimento, com baixo valor de avanço ( $a = 200$  mm/min) e alta velocidade de rotação ( $N = 800$  rpm). No entanto, nessa condição a rugosidade da chapa foi visivelmente comprometida, apresentado a aparência característica do “efeito casca de laranja” (*orange peel effect*) na parte externa. Este tipo de defeito também verificado em alguns experimentos nos estudos de Hamilton e Jeswiet (2010) para valores de avanço muito mais elevados (entre 5080 e 8890 mm/min). Na Figura 34 fica evidente a elevada rugosidade apresentada na superfície externa do 10º experimento quando comparada com o 7º experimento (semelhante aos demais).

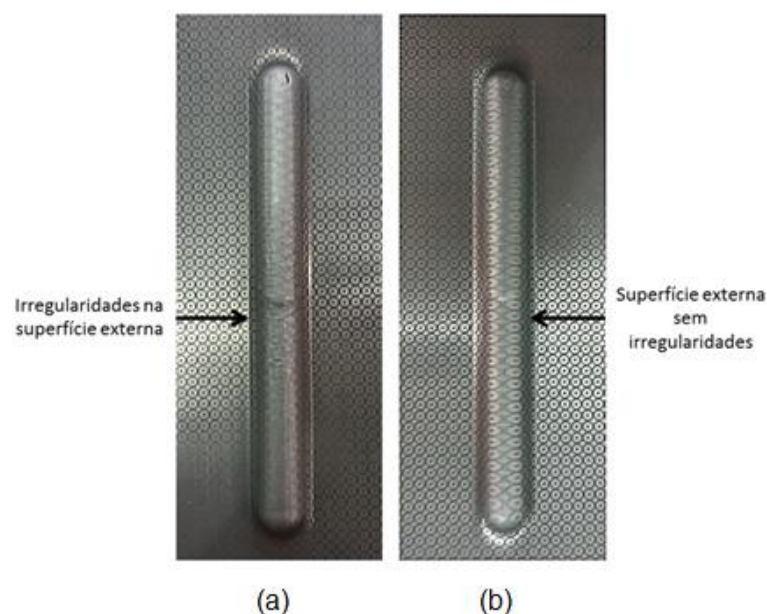


Figura 34: (a) Superfície externa com irregularidades - experimento 10 e (b) sem irregularidades - demais experimentos

Além disso, o 10º experimento também apresentou irregularidades na parte interna. A Figura 35 apresenta a comparação entre as superfícies internas do 10º experimento (com muitas irregularidades) e do 7º experimento (com a aparência uniformemente lisa, muito semelhante à dos demais experimentos).

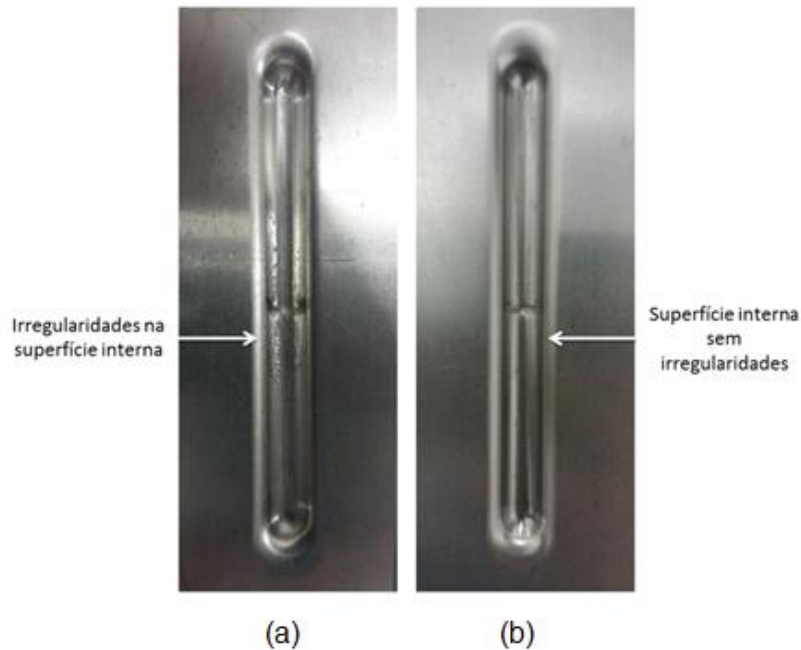


Figura 35: (a) Superfície interna com irregularidades - experimento 10 e (b) sem irregularidades (demais experimentos)

Nos demais ensaios, as superfícies não apresentaram comprometimento algum em sua rugosidade que fossem visíveis a olho nu.

Com base nos dados obtidos nos 12 experimentos, foi possível agrupar os resultados de deformação em três Retas Limite de Fratura (RLF): a primeira com RLC com o menor valor de deformação para os ensaios nº 3, 6, 8, 9, 11 e 12; a segunda RLF com valor intermediário de deformação para os ensaios nº 1, 2, 4, 5 e 7; a terceira reta com maior valor de deformação para o ensaio nº 10, conforme indicado na Figura 36.

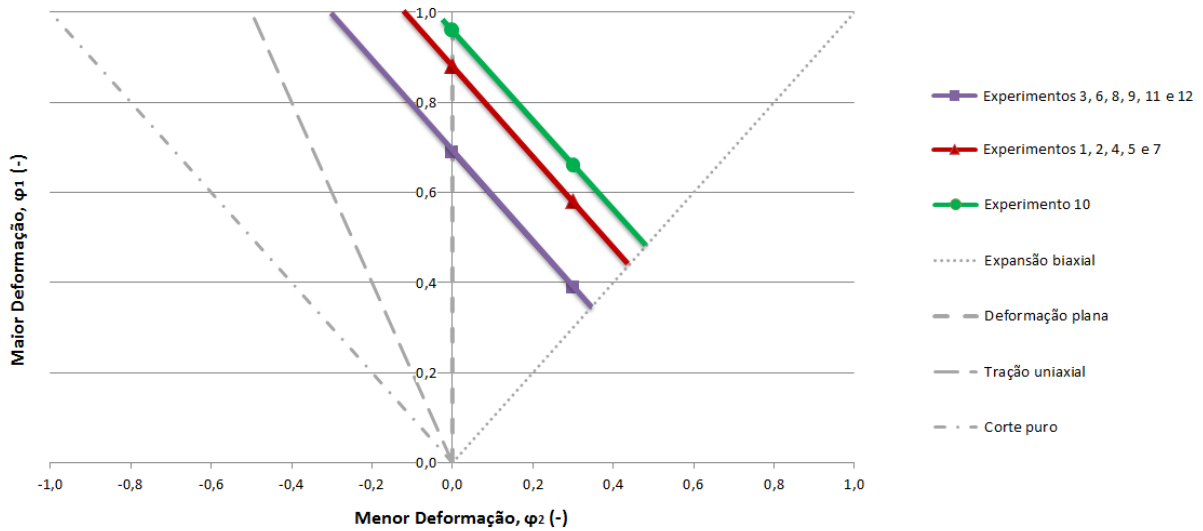


Figura 36: Retas Limite de Fratura (RLF) para Estampagem Incremental de AA1200, com ferramenta de diâmetro 9,5 mm

## 4.2 EXPERIMENTOS COM FERRAMENTA DE DIÂMETRO 22 mm

Nos últimos 12 experimentos, realizados com ferramenta de diâmetro 22 mm, variando os parâmetros de avanço e rotação e mantendo o incremento vertical constante em 0,5 mm, foi construída a Tabela 2.

Nela também foram adicionados os resultados de cada experimento, como a profundidade em que ocorreu a trinca  $h_1$ , a espessura final da chapa  $s_1$ , a deformação no comprimento  $\varphi_1$ , a deformação na largura  $\varphi_2$ , e a deformação na espessura  $\varphi_3$ .

Tabela 2: Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200, com  $\Delta z = 0,5$  mm, com ferramenta de diâmetro 22 mm

Nº	N (rpm)	a (mm/min)	$h_1$ (mm)	$s_1$ (mm)	$\varphi_1$ (-)	$\varphi_2$ (-)	$\varphi_3$ (-)
13	livre	200	11,0	0,44	0,83	0	-0,83
14	livre	400	11,0	0,44	0,83	0	-0,83
15	livre	800	11,0	0,44	0,83	0	-0,83
16	200	200	11,0	0,44	0,83	0	-0,83

17	200	400	11,0	0,44	0,83	0	-0,83
18	200	800	11,0	0,44	0,83	0	-0,83
19	400	200	11,0	0,44	0,83	0	-0,83
20	400	400	11,0	0,44	0,83	0	-0,83
21	400	800	11,0	0,44	0,83	0	-0,83
22	800	200	11,5	0,40	0,92	0	-0,92
23	800	400	11,0	0,44	0,83	0	-0,83
24	800	800	10,0	0,48	0,74	0	-0,74

Nos experimentos 13 a 24 a deformação  $\varphi_1$  variou de 0,74 a 0,92 com a deformação  $\varphi_2$  se mantendo em 0, o que caracteriza a deformação plana, medidas ao lado da trinca. A deformação na espessura  $\varphi_3$  foi determinada pela lei da constância de volume, que determina que a variação das deformações é nula.

A profundidade em que ocorreu a trinca  $h_1$  foi determinada de acordo com a profundidade registrada no painel do centro de usinagem CNC no instante em que cada experimento foi interrompido, variando de 10,0 mm a 11,5 mm.

Na Figura 37 é apresentada a relação entre rotação ( $N$ ) e deformação máxima obtida ( $\varphi_1$ ) para cada avanço ( $a$ ) utilizado nos experimentos.

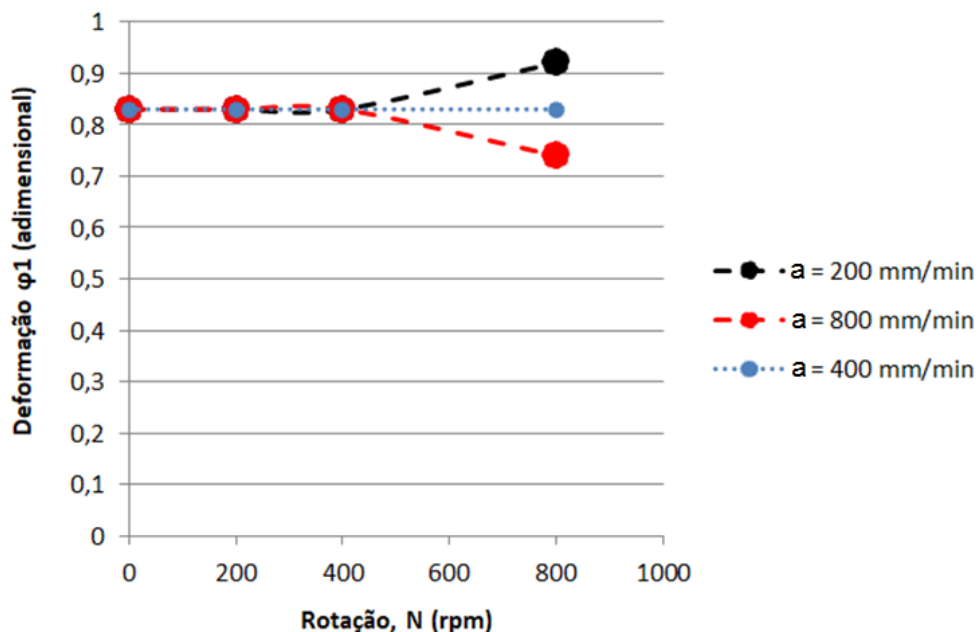


Figura 37: Relação de rotação ( $N$ ) e deformação ( $\varphi_1$ ) para cada velocidade de avanço ( $a$ ) nos experimentos de Estampagem Incremental, com ferramenta de diâmetro 22 mm  
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019

O gráfico da Figura 37 indica que quanto menor a velocidade de avanço maior a estampabilidade no processo de Estampagem Incremental, assim também visto pelos resultados da ferramenta de diâmetro 9,5mm e concluído por Arruda (2010). Também é possível avaliar que o avanço de 0 mm/min à 400 mm/min não influenciam no índice de deformações, ou seja, na profundidade estampada, enquanto que com o avanço de 800 mm/min, foram identificadas a menor deformação plástica, no entanto, com avanço de 800 mm/min, há diminuição na profundidade estampada com a rotação de 800 rpm.

É possível analisar que com um baixo avanço há o aumento da deformação máxima com a rotação 800 rpm, conforme conclusões dos estudos de Xu *et al.* (2013), utilizando o mesmo incremental vertical e faixa de avanço próxima a 200 mm/min, a estampabilidade aumenta conforme a rotação da ferramenta vai aumentando, ou seja, com avanço de 200 mm/min, há aumento na profundidade estampada com 800 rpm.

A figura 38 apresenta dados das melhores condições de Estampagem Incremental, ou seja, onde foi possível obter um maior índice de deformação plástica, ocorreu com avanço baixo ( $a = 200$  mm/min) e alta rotação ( $N = 800$  rpm), sendo assim, na ferramenta de diâmetro de 22mm só há influência na estampabilidade com altas rotações.

Com base nos dados obtidos nos experimentos 13 a 24 foi possível agrupar os resultados de deformação em três Retas Limite de Fratura (RLF): a primeira com RLC com o menor valor de deformação para os ensaios nº 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 23; a segunda RLC com valor intermediário de deformação para o ensaio nº 24; a terceira reta com maior valor de deformação para o ensaio nº 22, conforme indicado na Figura 38.

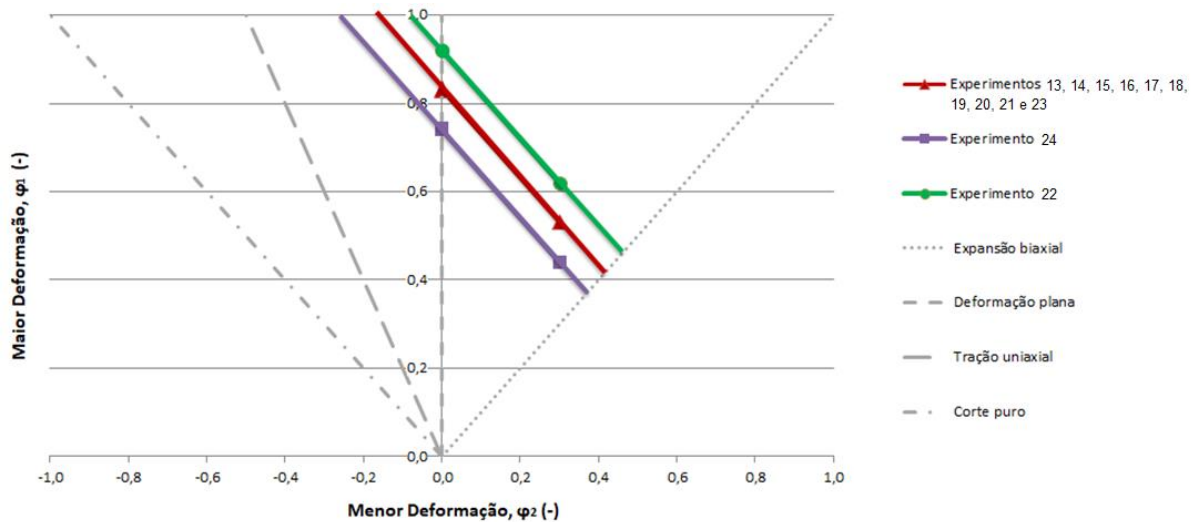


Figura 38: Retas Limite de Fratura (RLF) para Estampagem Incremental de AA1200, com ferramenta de diâmetro 22 mm.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019

## 5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Nos primeiros 12 experimentos de Estampagem Incremental de alumínio puro AA1200 H14, utilizando ferramenta de diâmetro 9,5 mm, foi verificado que as maiores deformações nas chapas podem ser obtidas utilizando baixos valores de velocidade de avanço, assim como constatado nos estudos de Arruda (2010) combinadas com altos valores de rotação, assim como também verificado por Xu *et al.* (2013).

Apenas no experimento em que se utilizou a menor velocidade de avanço (200 mm/min) com a maior velocidade rotação da ferramenta (800 rpm) foram constatadas irregularidades nas superfícies internas e externas da chapa, caracterizando o “efeito casca de laranja”. Este defeito foi encontrado em experimentos realizados por Hamilton e Jeswiet (2010) com altos valores de avanço.

Nestes experimentos com ferramenta de diâmetro 9,5 mm foi verificado com o avanço de 800 mm/min a deformação máxima obtida pela chapa na Estampagem Incremental se mantém constante, independente da rotação utilizada.

Nos experimentos 13 a 24, utilizando a ferramenta de diâmetro de 22 mm, foram obtidas as maiores deformações nas chapas estampadas, por meio da combinação de baixos valores de avanço com altos valores de rotação, assim como verificado também nos experimentos com a ferramenta de diâmetro de 9,5 mm e também descrito nos estudos de Arruda (2010) e Xu *et al.* (2013).



Diferente do que foi verificado com a ferramenta de diâmetro 9,5 mm, nos experimentos realizados com ferramenta de diâmetro 22 mm a deformação máxima obtida na Estampagem Incremental é menos sensível à variação dos parâmetros de rotação e avanço. Já que na maioria dos experimentos as deformações se mantiveram constantes.

Com base na análise dos 24 experimentos, foi possível determinar diferentes Retas Limite de Fratura para a mesma chapa, de acordo com a variação dos parâmetros de velocidade de avanço, rotação e diâmetro da ferramenta, conforme também verificado por Schreiber e Schaeffer (2018).

Assim como verificado por Al-Ghamdi e Hussain (2015) e Schreiber (2018), neste trabalho também se constatou que podem ser obtidas maiores deformações na Estampagem Incremental utilizando menores diâmetros de ferramenta.

## 6 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma análise de 24 experimentos de Estampagem Incremental de alumínio puro AA1200 H14, comparando quatro velocidades de rotação e dois diâmetros de ferramenta de estampagem com as deformações obtidas. Através destes experimentos foi possível estabelecer as conclusões a seguir:

1. Com ferramenta de diâmetro 9,5 mm:
  - a) As maiores deformações foram obtidas com as menores velocidades de avanço combinadas com as maiores rotações;
  - b) Quando se utiliza altos valores de velocidade de avanço de ferramenta (800 mm/min) a variação de rotação não apresenta influência na estampabilidade;
  - c) Há uma faixa de parâmetros ( $a = 200$  mm/min e  $N = 800$  rpm) em que se obtêm elevadas deformações na chapa, no entanto, esta apresenta defeitos superficiais.
  
2. Com ferramenta de diâmetro 22 mm:

- a) As maiores deformações também foram obtidas com as menores velocidades de avanço combinadas com as maiores rotações;
- b) Na maior parte dos experimentos a variação da velocidade de avanço e de rotação não influenciou na estampabilidade.

Em relação às duas séries de experimentos:

- c) É possível determinar diferentes Retas Limite de Fratura para o mesmo material variando os parâmetros de Estampagem Incremental, como diâmetro de ferramenta, velocidade de avanço e rotação da ferramenta;
- d) As maiores deformações foram obtidas utilizando menor diâmetro de ferramenta.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Em trabalhos futuros existe a alternativa de avaliar:

- a) A influência do diâmetro da ferramenta na Estampagem Incremental utilizando um faixa maior de diâmetros de ferramentas;
- b) O impacto da utilização de diferentes espessuras de chapas no processo;
- c) Avaliar a influência do lubrificante no processo de Estampagem Incremental;
- d) Analisar formas de prensa chapas e seus resultados no produto final;
- e) Avaliar o retorno elástico da chapa.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-GHAMDI, K. A.; HUSSAIN, G. Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: Experimental and FE investigations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 88, p. 82–94, 2015.

ALLWOOD, J. M.; BRAMLEY, A.N.; RIDGMAN, T.W.; MILEHAM, A.R. A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, 2006, 2020:323, p. 323-327, 2005.

AL-OBAIDI, A.; KRÄUSEL, V.; LANDGREBE, D. Hot single-point incremental forming assisted by induction heating. **International Journal of Advanced Manufacturing**

**Technology**, [s. l.], v. 82, n. 5–8, p. 1163–1171, 2016.

AMBROGIO, G.; FILICE, L.; GAGLIARDI, F. Improving industrial suitability of incremental sheet forming process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 9–12, p. 941–947, 2012.

AMINO, M.; MIZOGUCHI M.; TERAUCHI Y.; MAKI T. Current status of “Dieless” Amino’s incremental forming. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 81, n. October, p. 54–62, 2014.

ARAGHI, B.T.; MANCO, G.L.; BAMBACH, M.; HIRT, G. Investigation on Incremental Sheet Forming Combined with Laser Heating and Stretch Forming for the Production of Lightweight Structures. **Key Engineering Materials**, Aedermannsdorf, v. 473, p. 919–928, 2011.

ARRUDA, R. P. de. **Estampagem Incremental na Conformação de Chapas para Fabricação de Coletores Solares Planos**. 2010. 96 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

AZEVEDO, N. G. *et al.* Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Seoul, v. 16, n. 3, p. 589–595, 2015.

BAMBACH, M. Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process. **AIP Conference Proceedings**, [s. l.], v. 712, p. 1969–1974, 2004. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1766822>>. Acesso em: 24 jan. 2019.

BARUAH, A.; PANDIVELAN, C.; JEEVANANTHAM, A. K. Optimization of AA5052 in

incremental sheet forming using grey relational analysis. **Measurement**, Oxford, v. 106, p. 95–100, 2017.

BHATTACHARYA, A.; MANEESH, K.; CAO, J. Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, [s. l.], v. 133, n. December, 2011.

CASTELAN, J. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. 2010. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CENTENO, G.; SILVA, M.B.; CRISTINO, V.A.M.; VALLELLANO, C.; MARTINS, P.A.F. Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming. **Materials and Design**, [s. l.], v. 63, p. 20–29, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.066>>. Acesso: 24 jan. 2019.

DALEFFE, A. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Alumínio Puro**. 2008. 84 f. Dissertação de Mestrado, LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre. 2008.

DE SENA, J. I. V. **Estampagem incremental**: Um novo conceito de produção. Aveiro: Dissertação - Universidade de Aveiro, 2009.

DUFLOU, J. R.; VERBERT, J.; BELKASSEM, B.; GU, J.; SOL, H.; HENRARD, C.; HABRAKEN, A. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 253–256, 2008. a.

DUFLOU, J.R.; VERBERT, J.; BELKASSEM, B.; GU, J.; SOL, H.; HENRARD, C.;

HABRAKEN, A.. Improved SPIF performance through dynamic local heating. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 48, n. 5, p. 543–549, 2008. b.

EMMENS, W. C.; SEBASTIANI, G.; BOOGAARD, A. H. V. D. The technology of Incremental Sheet Forming-A brief review of the history. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 210, n. 8, p. 981–997, 2010.

FILIFE, P. **Aplicação da Estampagem Incremental no fabrico de moldes: Estudo de viabilidade técnico-económica para industrialização**. Porto: Dissertação - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP), 2013.

FRITZEN, D. **Estudo Do Processo De Estampagem Incremental Em Chapa De Latão 70/30**. 2012. [s. l.], 2012.

HAM, M.; JESWIET, J. Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming CIRP. **Annals-Manufacturing Technology**, p 277 – 280, 2006.

HAMILTON, K.; JESWIET, J. Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 59, n. 1, p. 311–314, 2010.

HIRT, G. Forming strategies and Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 203–206, 2004.

HIRT, G.; WITULSKI, N. **Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation**. Institute of Materials Technology / Precision Forming (LWP), Saarland University, Germany, 2005.

JACKSON, K.; ALLWOOD, J. The Mechanics of Incremental Sheet Forming. **Journal**

of **Materials Processing Technology**, v. 209, n. 3, p. 1158-1174, 2009.

JESWIET, J.; SZEKERES, A. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 88–114, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607600213>>. Acesso em: 24 jan. 2019.

KOPAC, J.; KAMPUS, Z. Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 162–163, n. SPEC. ISS., p. 622–628, 2005.

LESZAK, E. **Apparatus and process for incremental dieless forming. US3342051A, 19 set.** 1967.

LORA, F. A. Avaliação Das Deformações No Aço Dc04 Quando Submetido Ao Processo Híbrido De Estampagem Incremental Posterior Ao Processo Convencional. **Igarss 2014**, [s. l.], n. 1, p. 1–5, 2014.

MARTINS, P. A. F.; BAY, N.; SKJØDT, M.; SILVA, M. B. Theory of single point incremental forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 247–252, 2008.

MARTINS, P. A. F.; BAY, N.; SKJØDT, M.; SILVA, M. B. Single point incremental forming of polymers. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 229–232, 2009.

MAXIMILIANO, G. **Estampagem Incremental de Múltiplos Passes em Chapa de Latão C268**. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade

Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MEIER, H.; MAGNUS, C.; SMUKALA, V. Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 327–330, 2011.

MIN, J. *et al.* Experimental and numerical investigation on incremental sheet forming with flexible die-support from metallic foam. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 31, p. 605–612, 2018.

PALUMBO, G.; BRANDIZZI, M. Experimental investigations on the single point incremental forming of a titanium alloy component combining static heating with high tool rotation speed. **Materials and Design**, Amsterdam, v. 40, p. 43–51, 2012.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica - Vol. 1**. Lisboa: Escolar Editora, 2010.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SCHREIBER, R, G. **Estampagem Incremental e Soldagem FSW para Fabricação de coletor Solar**. 2018. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SCHREIBER, R, G.; SCHAEFFER, L. Manufacture of absorber fins for solar collector using incremental sheet forming. **Journal of Materials Research and Technology**, [s.l.], p. 1–9. 2018.

SENA, J. I. V. de. **Estampagem incremental: Um novo conceito de produção**. 2009.



Tese (Dissertação de Mestrado). Universidade de Aveiro Ano 2009 Departamento de Engenharia Mecânica, Aveiro, 2009.

SHAFFER, T, S.R.D. **Incremental sheet metal forming by industrial robots using a hammering tool**. 10emes Assises Europeennes de Prototypage Rapide, Paris, France, 2004.

SILVA, P.J. **Estampagem incremental utilizada para prototipagem de peças de aço ABNT 1008 e ABNT 304**. 2011. Dissertação de mestrado. UNB, Brasília/DF, 2011.

SOEIRO, J.M.C. **Enformabilidade em estampagem Incremental**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal, 2014.

TIBURI, F. **Aspectos do processo de Estampagem Incremental**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

VIHTONEN, L.; TUOMI, J. Incremental sheet forming (ISF) as small batch production method. **3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping**, Leiria, Portugal, September 24-29. p. 611-6, 2007.

XU, D. *et al.* Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 73, p. 37–46, 2013.