

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Daniel de Castro Maciel

**COMPARAÇÃO DE DUAS FERRAMENTAS DE CONTATO NO ESTUDO DA
ESTAMPAGEM INCREMENTAL DA LIGA DE ALUMÍNIO EN AW-1100**

Belo Horizonte

2016

Daniel de Castro Maciel

**COMPARAÇÃO DE DUAS FERRAMENTAS DE CONTATO NO ESTUDO DA
ESTAMPAGEM INCREMENTAL DA LIGA DE ALUMÍNIO EN AW-1100**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação e Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC Minas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva

Área de concentração: Engenharia Mecânica

Belo Horizonte

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

M152c Maciel, Daniel de Castro
Comparação de duas ferramentas de contato no estudo da estampagem incremental da liga de alumínio EN AW-1100 / Daniel de Castro Maciel. Belo Horizonte, 2016.
108 f.: il.

Orientador: Gilmar Cordeiro da Silva
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Máquinas-ferramenta. 2. Estampagem (Metais). 3. Ligas de alumínio. 4. Conformação de metais. 5. Tensões residuais. 6. Análise de variância. I. Silva, Gilmar Cordeiro da. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 621.7.04

Daniel de Castro Maciel

**COMPARAÇÃO DE DUAS FERRAMENTAS DE CONTATO NO ESTUDO DA
ESTAMPAGEM INCREMENTAL DA LIGA DE ALUMÍNIO EN AW-1100**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação e Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC Minas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva-Puc- Minas (Orientador)

Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro (Examinador interno) – Puc-Minas

Prof. Dr. Pedro Paiva Brito (Examinador Interno) – Puc-Minas

Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício (Examinador Externo) – CEFET – Divinópolis

Belo Horizonte, 2 de dezembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado força e saúde para vencer os desafios que encontrei e encontro pela frente.

Ao meu orientador Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva e amigo pela dedicação, estímulo, ensinamentos transmitidos, além da boa vontade em sempre me ajudar.

A minha mãe pela paciência e carinho.

A meu pai pelos sábios conselhos e determinação.

Aos meus colegas Diego Raimundi Corradi, Fernanda C. T. Dias Troysi, Luís Henrique Andrade Maia, Norberto Martins e Lúcio Flávio Santos Patrício pelas valiosas sugestões e ajuda no trabalho.

A minha namorada que entendeu os momentos onde não pode estar presente.

A toda minha família principalmente a minha tia Alexandra e tio João Luiz que sempre me recebem bem em sua casa, a meus primos Samuel Oliveira e João Oliveira pelos conselhos e ideias.

A Elizângela Souza Prado da Silva pela paciência e atenção em ajudar.

Aos técnicos do laboratório Ítalo Bruno dos Santos, Thaís Roberta Campos, Lucas Wilker de Moraes e Thiago Marcio de Oliveira Silva pelo auxílio na execução da parte prática do trabalho.

À Valéria, Pós-Graduação pelo grande apoio.

Agradecimento especial a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pela infraestrutura e suporte para elaboração do trabalho, e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento da minha bolsa de estudo.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“Se você só estiver disposto a realizar o que é fácil, a vida será difícil. Mas se concorda em fazer o que é difícil, a vida será fácil.”

(T. HARV EKER, 2005, p. 157).

RESUMO

A estampagem incremental se tornou alvo de estudo por possibilitar, a partir de uma chapa plana, fabricar peças de geometria complexa sem uso de prensas e ferramentais que oneram os custos de fabricação. O processo possui aplicações em diversos setores da indústria, tais como aeronáutico, automotivo, eletrodomésticos, além de grande relevância na área hospitalar, principalmente na fabricação de próteses. A deformação plástica da chapa por sucessivos incrementos de uma única ferramenta, com movimento nos três eixos cartesianos deve ser bem entendida, pois sabe-se que o endurecimento do material aumenta quando a deformação imposta pela ferramenta também aumenta, ou seja, durante a conformação incremental o material modifica estruturalmente, proporcionando zonas frágeis onde o mesmo pode romper. Este efeito pode ser controlado modificando a forma de atuação da ferramenta no material. O presente trabalho estuda o processo de estampagem incremental da liga de alumínio EN AW-1100, espessura 1mm. Foram utilizadas duas ferramentas, uma com a ponta esférica rotativa acoplada a um suporte que se assemelha a ponta de uma caneta esferográfica e outra com ponta esférica usinada diretamente no suporte, sendo ambas com diâmetro de 12mm. Foram utilizados o incremento constante de 0,5mm/passe com velocidade de 1500 mm/min e três modos de lubrificação (a seco, vaselina e grafite em pó). A metodologia utilizada na obtenção do ângulo limite foi eficiente e reduziu o número de experimentos. O valor encontrado para o ângulo limite da liga, com utilização da melhor condição de estampagem obtida, ou seja, ferramenta rotativa e lubrificação a base de vaselina foi de 76,434°. A utilização do teste estatístico ANOVA se mostrou eficiente na avaliação da resposta ao comportamento da rugosidade superficial Ra e Rq. Quando verificado o comportamento da espessura ao longo da geratriz de um cone reto, na melhor condição ferramenta/lubrificante. Observa-se que ocorreu variação ao longo do comprimento mensurado. Portanto buscou-se um melhor entendimento do mecanismo da deformação no processo de estampagem avaliando o acabamento superficial e a espessura com uso dos dois tipos de ferramenta de contato.

Palavras-chave: Estampagem Incremental. Alumínio. Ferramenta de contato. Teste ANOVA

ABSTRACT

Incremental stamping has become a studying target because it allows manufacturing complex geometry pieces by a flat metal sheet without using press or tools. Things that are responsible for rising the fabrication price. The process have applications in different industry sectors, such as aeronautical and prostheses fabrication. Metal sheet plastic deformation by successive increments with one only tool, moving in all the three cartesian axis has to be well understood because is known that the material hardening increases when the deformation imposed on the tool increases too. In other words, during incremental stamping, the material is structurally modified, causing fragile zones where the material becomes easily breakable. This effect can be controlled if modified the tool action form on the metal sheet. The present work studs incremental stamping process on aluminum alloys. Two tools were made: one has an independent rotational spherical point, attached to a structure that imitates a ballpoint pen; and another one is spherical point directly machined on a support. Both have 12mm diameter. Has been decided not using the contact tool rotation. Has been used a constant increment of 0.5 mm/pass, in a speed of 1500 mm/min, and three lubricant modes. The use of ANOVA statistical test can prove that the obtained results present a superficial roughness variation, and a material deformed thickness variation. Thus, a better understanding has been searched about the deformation mechanism on stamping processes, evaluating the superficial finishing, and the thickness when using both types of contact tools.

Keywords: Incremental Stamping. Aluminum. Contact Tool. ANOVA Test.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Esquemático do processo convencional.....	38
FIGURA 2 - Principais movimentos realizados pela ferramenta.....	40
FIGURA 3 - Diferentes configurações do ISF. a) ponto simples – sem apoio inferior; b) ponto duplo com apoio; c) ferramenta inferior com cavidade; d) ferramenta inferior com saliência.....	41
FIGURA 4 – Estampagem Incremental Híbrida Princípio do processo de combinação SF+ISF, (A) Instalação; (B) Processo SF; (C) Processo ISF.	42
FIGURA 5 - Robô utilizado na estampagem incremental.....	43
FIGURA 6 - Produção de peça CNC.....	44
FIGURA 7 - Robô utilizado na estampagem incremental.....	44
FIGURA 8 - Ferramentas com diferentes diâmetros	45
FIGURA 9 - Geometrias variadas.....	46
FIGURA 10 - Geometrias variadas.....	47
FIGURA 11– Aplicação medicina	47
FIGURA 12 - Geometrias variadas.....	48
FIGURA 13 - Aplicação lei do seno.....	49
FIGURA 14 - Incrementos verticais.....	50
FIGURA 15 - Incrementos verticais.....	50
FIGURA 16 - Incrementos verticais.....	52
FIGURA 17 - Simulação elementos finitos	53
FIGURA 18 - Simulação da espessura do material.....	54
FIGURA 19 - Esquema da barreira lubrificante isolando a superfície da ferramenta com superfície da chapa metálica	59
FIGURA 20 - Vista bidimensional ampliada de um perfil em uma superfície	62
FIGURA 21 - Vista tridimensional ampliado de uma área em uma superfície.....	62
FIGURA 22 - Rugosidade média Ra	63
FIGURA 23 - Variações do parâmetro Rku	64
Figura 24 - Fluxograma do trabalho	69
FIGURA 25 – Medidas corpo de prova	70
FIGURA 26 – Corpo de prova a 0°,45, e 90°	71
FIGURA 27 – Máquina de ensaio de tração Instron 4467.....	71
FIGURA 28 – Croquis da ferramenta nova.....	72

FIGURA 29 – Croquis das ferramentas.....	73
FIGURA 30 – Suporte prensa chapa.....	74
FIGURA 31 - Ângulo de parede máximo.....	74
FIGURA 32 - Geometria de estampagem	75
FIGURA 33 – Pontos de medição	77
FIGURA 34 – Força (N) X Deformação (mm) - CP0°	80
FIGURA 35 – Tronco de cone ferramenta rígida.....	83
FIGURA 36 – Tronco de cone ferramenta rígida.....	84
FIGURA 37 – Tronco de cone ferramenta rígida.....	84
FIGURA 38 – Tronco de cone ferramenta rotativa	85
FIGURA 39 – Tronco de cone ferramenta rotativa	86
FIGURA 40 – Tronco de cone ferramenta rotativa	86
FIGURA 41 – Cone estampado.....	87
FIGURA 42– Região medição da espessura.....	88
FIGURA 43 – Variação da espessura ao longo do comprimento do cone	89
FIGURA 44 – Valores máximo e mínimos de rugosidade média	91
FIGURA 45 – Valores máximo e mínimos Rq	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Valores de Rugosidade Superficial.....	46
TABELA 2 - Diâmetro da ferramenta (mm)	49
TABELA 3 - Materiais	54
TABELA 4 - Estudos recentes de materiais	55
TABELA 5 – Resultado análise química.....	79
TABELA 6 – Liga de alumínio	80
TABELA 7- Principais características mecânica liga da Alumínio 1100 a 0° do sentido da laminação	81
TABELA 8- Principais características mecânica liga da Alumínio 1100 a 45° do sentido da laminação	81
TABELA 9- Principais características mecânica liga da Alumínio 1100 a 90° do sentido da laminação	81
TABELA 10- Anisotropia normal.....	82
TABELA 11 – Resultados Ferramenta rígida	85
TABELA 12 – Resultados Ferramenta rotativa.....	87
TABELA 13 – Média aritmética dos desvios da superfície	90
TABELA 14 – Raiz quadrada das médias dos quadrados	92
TABELA 15 – Média e variância das amostras	94
TABELA 16 – Anova Ra.....	94
TABELA 17 – Média e variância das amostras	94
TABELA 18 – Anova Rq.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS LATINOS

V	Velocidade (m/min)
l	Incremento vertical (mm)
T_i	Soma dos valores na amostra i
n_i	Tamanho da amostra i
n	Número de valores em todas as amostras = $n_1 + n_2 + n_3 + \dots$
k	Número de diferentes amostras (ou tratamentos)
T_0	Espessura inicial da chapa
T_1	Espessura com ângulo de conformação
R_a	Média aritmética dos desvios da superfície
R_q	Raiz quadrada da média dos quadrados do perfil
R_{ku}	Distribuição e forma dos picos na superfície
d_c	Diâmetro do punção (ou cunho)
d_m	Diâmetro da matriz
j	Folga radial entre o punção e a matriz (geralmente superior à espessura inicial da chapa)
r_{cc}	Raio de canto do punção (ou cunho)
r_{cm}	Raio de canto da matriz
F_{enc}	Força aplicada pelo prensa-chapas (ou encostador)
v	Velocidade do punção
F_{crit}	Fator crítico
F_i	Força de fricção
F_a	Força de adesão
F_d	Força de deformação
R	Índice de anisotropia
W_f	Largura final do corpo de prova
W_0	Largura inicial do corpo de prova
t_f	Espessura final do corpo de prova
t_0	Espessura inicial do corpo de prova

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\sum x$ Soma dos valores em todas as amostras = $T_1 + T_2 + T_3 + \dots$

$\sum x^2$ Soma dos quadrados dos valores em todas as amostras

ω Rotação (RPM)

φ Ângulo de inclinação da chapa

\varnothing_{\max} Ângulo máximo

σ_{rup} Tensão de Ruptura

σ_{esc} Tensão de escoamento

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três dimensões
CAD	Desenho auxiliado por computador
CAM	Produção auxiliada por computador
CNC	Comando numérico computadorizado
EI	Estampagem incremental
EP	Extrema pressão
FLD	Diagrama limite de forma
ISF	Estampagem incremental
MEF	Método de elementos finitos
MQD	Varição dentro das amostras
MQE	Varição entre amostra
RMS	Valor médio quadrático
SPIF	Estampagem incremental de ponto único
SQD	Soma dos quadrados dentro dos grupos
SQE	Soma dos quadrados entre os grupos
SQP	Sequencia quadrática programada
TPIF	Duplo contato entre ferramenta e peça

SUMARIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 Justificativa	29
1.2 Objetivo geral	29
1.2.1 <i>Objetivos específicos</i>	29
2 ESTADO DA ARTE	31
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	37
3.1 Conformação de chapas	37
3.2 Estampagem Incremental	39
3.2.1 <i>Máquinas para estampagem incremental</i>	42
3.2.2 <i>Ferramentas para estampagem incremental</i>	45
3.2.3 <i>Aplicação dos produtos da estampagem incremental</i>	46
3.3 Limites de Geometria	48
3.4 Limites da ferramenta	49
3.5 Limites do incremento vertical	50
3.6 Influência da velocidade de rotação da ferramenta	51
3.7 Influência da velocidade de avanço	51
3.8 Trajetória da ferramenta	51
3.9 Estudos referente a simulação numérica da estampagem incremental	52
3.10 Tipos de materiais aplicados na estampagem	54
3.11 Atrito na Estampagem incremental	55
3.12 Desgaste por deslizamento	56
3.13 Desgaste por rolamento	57
3.14 Lubrificantes e lubrificação na estampagem incremental	58
3.15 Rugosidade	61
3.15.1 <i>Média aritmética dos desvios da superfície (Ra)</i>	62
3.15.2 <i>Raiz quadrada das médias dos quadrados (Rq)</i>	63
3.15.3 <i>Distribuição e forma dos picos na superfície (Rku)</i>	64
3.16 Teste ANOVA de Fator Único para Diferença Entre Mais de duas Médias Aritméticas	65
4 METODOLOGIA	68
4.1 Etapa preparatória	70
4.1.1 <i>Análise química</i>	70
4.1.2 <i>Ensaio de tração</i>	70
4.1.3 <i>Projeto e construção das ferramentas de contato</i>	72
4.2 Determinação do ângulo limite ou parede máxima	73
4.3 Experimento com geometria de cone reto	75
4.4 Análise dos experimentos	76
4.4.1 <i>Mensuração da espessura</i>	76
4.4.2 <i>Mensuração da Rugosidade</i>	76
4.5 Tratamento estatístico	77
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
5.1 Análise química	78
5.2 Ensaio de tração	80

5.3 Determinação Ângulo limite	83
5.4 Experimento com geometria de cone reto	87
5.5 Mensuração da espessura do cone reto	88
5.6 Mensuração da rugosidade do cone	89
5.7 Tratamento estatístico	93
6 CONCLUSÃO	96
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
REFERÊNCIA.....	99
APÊNDICE.....	104

1 INTRODUÇÃO

A concorrência no mundo capitalista dita regras em todas as esferas e a indústria não foge a isso. Dentro deste ambiente tenta-se criar processos de fabricação economicamente produtivos. Este conceito agrega tanto economia de tempo, processo e matéria-prima. Via de regra, em um cenário fabril produtivo, um processo só é viável caso seja aplicável em larga escala. Mas existe uma lacuna que vem demandando certa atenção. Protótipos e peças de baixa produção são, em grande parte, dispendiosos devido a atenção e tempo que demandam para a sua fabricação. No desenvolvimento de matrizes e operações de conformação plástica profunda, principalmente quando há necessidade do desenvolvimento de novos produtos, produção em baixa escala e/ou geometrias complexas, uma solução que tem se apresentado cada vez mais viável e com excelentes limites de conformabilidade é a estampagem incremental de chapas (EI), o que foi possível graças à flexibilização dos equipamentos. Segundo Jeswiet (2005) a ideia de estampagem incremental começou com um único ponto de contato, onde uma ferramenta controlada por um centro de usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado) aplica uma força localizada com a finalidade de realizar deformação plástica pontual, sendo bem aceita quando a produção é ditada pela baixa escala e com elevado grau de complexidade.

Jeswiet (2001) evidenciou que este processo é usado para conformar chapas metálicas em formas complexas sem uso de matrizes, usando para isto uma ferramenta metálica de contato pontual, montada num centro de usinagem, com o objetivo de deformar plasticamente o material, através do movimento da peça e/ou da ferramenta, principalmente no plano vertical. O processo, genericamente chamado de Estampagem Incremental de Chapas, é também conhecido, quando a ferramenta de conformação é de contato único, como Single Point Incremental Forming (SPIF), ou ainda, dependendo de como a peça é conformada (interna ou externamente), o processo ainda pode receber a denominação de Negativo ou Positivo. De acordo com a geometria, pode-se ainda nomeá-lo como Simétrico ou Assimétrico.

Segundo Lopes (2013) vários trabalhos mostram que na estampagem incremental a formabilidade da chapa é maior que no processo convencional.

De acordo com Yanle (2014) o processo de estampagem incremental tem sido atrativo nas últimas décadas pela grande flexibilização dos maquinários, da conformabilidade dos materiais e redução de forças no processo.

Segundo Patrício (2011) os fundamentos teóricos da estampagem incremental começaram a ser objeto de atenção da comunidade científica internacional, uma vez que durante a primeira metade da década de 2000, os conhecimentos que se tinham eram praticamente os obtidos experimentalmente. Uma das etapas críticas da viabilidade da utilização do processo é a caracterização do material, que deve suportar determinados estados de tensão sem se romper.

No campo do acabamento superficial, Jeswiet e Hamilton (2010) investigaram os efeitos das altas velocidades de rotação da ferramenta e da velocidade de avanço sobre a rugosidade na parte externa (sem contato com a ferramenta) onde comumente ocorre o efeito “casca de laranja”. Verificou-se que o aparecimento deste efeito é influenciado principalmente, pelo raio de ponta da ferramenta de contato e pelo incremento vertical. No entanto, outros fatores como material, espessura, ângulo de inclinação, e velocidade de rotação provavelmente também influenciam a rugosidade interna e externa.

O presente trabalho estuda o processo de estampagem incremental da liga de alumínio EN AW-1100 espessura 1mm. Foram utilizadas duas ferramentas, uma com a ponta esférica rotativa acoplada a um suporte que se assemelha a ponta de uma caneta esferográfica e outra com ponta esférica usinada diretamente no suporte, sendo ambas com diâmetro de 12mm. Foram utilizados o incremento constante de 0,5mm/passe com velocidade de 1500 mm/min e três modos de lubrificação (a seco, vaselina e grafite em pó). A metodologia utilizada na obtenção do ângulo limite foi eficiente e reduziu o número de experimentos. A utilização do teste estatístico ANOVA se mostrou eficaz na avaliação da resposta ao comportamento da rugosidade superficial R_a (Média aritmética dos desvios da superfície) e R_q (Raiz quadrada da média dos quadrados do perfil). Quando verificado o comportamento da espessura ao longo da geratriz de um cone reto no ângulo limite e na melhor condição ferramenta/lubrificante, ocorreu da variação da espessura ao longo do comprimento mensurado, nesse sentido, a relação lei dos senos não foi comprovada na condição estudada. Portanto buscou-se um melhor entendimento do mecanismo de deformação no processo de estampagem avaliando

o acabamento superficial e a espessura com uso dos dois tipos de ferramenta de contato e melhor condição de lubrificação.

1.1 Justificativa

Justifica esse trabalho. Visto que o processo de estampagem incremental realizado em máquinas de usinagem de três eixos CNC tem grande potencial para aplicação em fabricas de prototipagem rápida aplicada a estampagem de peças com geometria complexas. A utilização da liga de alumínio se justifica, devido elevada busca da indústria automotiva em redução de peso dos veículos, bem como na fabricação de protótipos. A constante busca por parte da indústria na produção de peças estampadas com geometrias complexas, baixa escala de produção e baixa rugosidade superficial. Outro ponto a ser destacado é a boa conformabilidade do material e por consequência menor esforço no equipamento. Com utilização de ferramenta rotativa espera-se obter melhor deformação plástica devido as condições de atrito entre interface peça/ferramenta, consequentemente maior ângulo limite e uniformidade da espessura ao longo do comprimento deformado. O processo de fabricação por estampagem incremental é recente, e a deformação plástica obtida por ferramenta rotativa não tem sido amplamente estudada.

1.2 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo, por intermédio de uma máquina convencional CNC, avaliar a influência de duas ferramentas de contato: sendo uma com ponta rotativa e outra com ponta rígida, na estampagem incremental de uma liga de alumínio.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Projetar e construir uma ferramenta com ponta esférica rotativa a ser utilizada no processo de estampagem incremental em liga de alumínio;
- b) Aplicar uma metodologia que possibilite a definição do ângulo limite com redução do número de experimentos;

- c) Avaliar a melhor condição de estampagem para os pares, lubrificantes (grafite, vaselina, a seco) e ferramentas (rígida e rotativa) na obtenção do ângulo limite;
- d) Avaliar o comportamento da espessura ao longo da geratriz de um cone reto no ângulo limite e na melhor condição ferramenta/lubrificante;
- e) Avaliar, através de método estatístico, a resposta quanto ao comportamento da rugosidade superficial R_a e R_q na estampagem EI no cone reto.

2 ESTADO DA ARTE

O processo de estampagem incremental é recente, só começou a ser alvo de estudo por volta dos anos 90. O país precursor do processo foi o Japão pela necessidade de sua indústria automobilística em fazer protótipos (RODRIGUES, 2013).

Segundo Daleffe (2008) o processo (EI) pode ser definido como uma tecnologia de estampagem a frio sem uso de matriz e com auxílio de máquina de CNC ou Robôs. A empresa Amino Corporation é a proprietária da patente e tem comercializado esta tecnologia.

Jeswiet (2005) realizou estudos na aplicabilidade do processo e na influência do controle da deformação localizada no estudo da estampagem incremental de aços. O autor concluiu que o processo de estampagem incremental tem como vantagem, a possibilidade de utilização de equipamento CNC que geralmente é encontrado na indústria. Sendo amplamente utilizado em peças protótipo com geometria complexa, mas por outro lado pode apresentar um fenômeno conhecido como retorno elástico, dificultando a precisão entre o modelo e a peça real.

Da Silva (2011) estudou a estampagem incremental aplicada à prototipagem de peças de aço ABNT 1008 e ABNT 304 com espessura de 0.9mm. Seu objetivo foi determinar melhores parâmetros para as condições impostas, como rotação do mandril, avanço nos eixos X e Y e incremento em Z. Logo chegou à conclusão que a conformação de peças em sua plenitude somente foi obtida com chapa ABNT 1008, pois nas chapas de inox 304 a profundidade conformada foi no máximo 14mm, enquanto que para o inox 1008 foi 43,4mm nas condições e equipamento utilizados.

Já no campo da estratégia de estampagem incremental Azaouzi e Nadhir (2012), realizaram um trabalho no aperfeiçoamento da estratégia, visando a redução de custo, o tempo, e obtenção de espessura mais homogênea ao longo do comprimento da peça deformada. Para realização do trabalho contou com uma ferramenta de elementos finitos combinada com resposta em RMS (Valor Médio Quadrático) e um algoritmo de SQP (Sequencia Quadrática Programada). Chegando à conclusão que com a diminuição do tempo de execução da estampagem, houve uma maior variação da espessura do material. Já a utilização de técnicas de RMS e SQP apresentaram vantagens em poder capturar informações nas regiões do movimento da ferramenta. Nesta mesma linha de pesquisa Zhaobing Liu e outros

autores (2015) estudaram a estratégia de estampagem incremental com múltiplos passes. Concluíram que a deformação por múltiplos passes e a ferramenta de geração de estratégia influenciam na distribuição da tensão ao longo da espessura do material. Sendo que a rampa inicial tem pouca influência na espessura do material.

Os pesquisadores Myung-Sup e Jong-Jim (2001) realizaram um estudo voltado para a caracterização da formabilidade da liga de alumínio 1050 com ferramenta de contato livre. Em seu estudo foram aplicadas várias geometrias de peças. Concluiu-se que a fratura das peças geralmente ocorre nos cantos e os resultados da curva CLC são bem distintos para o processo convencional e o incremental.

Bagudanch, I. e outros autores (2015) realizaram um estudo na correlação dos parâmetros que influenciam o processo de estampagem incremental em polímeros, como diâmetro de ferramenta, espessura de chapa, força máxima, velocidade e temperatura. Concluíram que a temperatura é um fator crucial para o aparecimento de defeitos no material estampado e que a velocidade tem influência no surgimento de falhas das peças estampadas.

Martins e outros autores (2009) pesquisaram 5 tipos diferentes de material termoplásticos (Polietileno, Policloreto de Vinila, Poliamida, Policarbonato, e Poliacetal) para realização de estampagem incremental em forma de cone a temperatura ambiente. O estudo mostrou que o polímero tem grande potencial para peças com deformações profundas, e que o polietileno foi o material que apresentou maior ductilidade. Obteve-se um baixo retorno elástico do polietileno de vinila, já o Poliamida foi o que apresentou maior retorno elástico. Bagudanch, I. 2015, realizou um estudo no Policloreto de vinila, avaliando os parâmetros de rotação, incremento, velocidade de deformação, espessura e temperatura. Concluiu-se que a velocidade tem grande influência no acabamento superficial, uma vez que a alta rotação leva a um aumento da temperatura que por sua vez influencia a propriedade física do material e nas condições de atrito ferramenta/material.

Trabalho feito por Durante e outros autores (2008), na influência da rotação da ferramenta no processo de estampagem incremental na produção de pirâmides frustrum em liga de alumínio AA7075-T0. Concluíram que a rotação está diretamente ligada ao acabamento superficial, sendo que em altas rotações apresenta melhor acabamento superficial.

Em outro trabalho Durante e outros autores (2010), efetuaram um estudo na comparação entre o resultado analítico e o prático, na estampagem incremental em liga de alumínio, o resultado mostrou que os valores teórico e experimental da espessura, e da força em geral tem uma diferença de 10%.

Uma estratégia utilizada no trabalho de Malhotra R. e outros autores (2011), foi utilizar 2 ferramentas de estampagem ao mesmo tempo, uma deformando o material pelo lado interno e outra do lado externo da peça. Concluindo que em seu estudo numérico e prático houve aproximação dos resultados dimensionais.

Estudos no campo microestrutural foram feitos por Ambrogio e outros autores em 2013, em liga de titânio com utilização de altas velocidades de rotação. De acordo com o autor foi obtido um menor tempo na execução do processo e não houve variação significativa da microestrutura da liga de titânio, sendo mensurado um aumento de 20% da dureza superficial do material.

Maciel e outros autores (2016), investigaram o ângulo limite na estampagem incremental com uso de duas ferramentas distintas, uma com a ponta rígida e outra com a ponta rotativa, aplicada na chapa de alumínio 1100, com espessura 1mm. Foi utilizado uma condição com vaselina como lubrificante e outra sem lubrificação, observou que a melhor condição foi com a ferramenta rotativa e vaselina como lubrificante.

Maximiliano e outros autores (2016), investigaram o comportamento da chapa de latão C-268, com 0,50 mm de espessura, quando exposto ao processo de Estampagem Incremental de Chapas de Metal (Incremental Sheet Metal Forming - ISMF). Os experimentos foram baseados em uma geometria de tronco de pirâmide de base quadrada com 100 mm de lado e 45 mm de profundidade. O ângulo de parede obtido por SPIF (Single Point Incremental Forming) foi maior do que pelo estudo proposto por MSPIF (Multi Pass Single Point Incremental Forming).

Guzmán e outros (2012), pesquisaram o processo de estampagem incremental aplicado a duas geometrias de pirâmides de diferentes profundidades. Em seu estudo foi utilizada a ferramenta de métodos de elementos finitos para comparar com os resultados práticos. Os resultados mostraram divergência, sendo que a força e espessura após a estampagem foram os que apresentaram diferenças significativas. Observaram que o local na estampagem incremental que apresenta maior retorno elástico geralmente é na mudança de ângulo da ferramenta.

No campo elétrico e econômico, Inagarao e outros autores (2014) fizeram um estudo no modelamento do consumo elétrico do equipamento no processo de estampagem incremental. Em seu estudo foram utilizados dois diferentes equipamentos, centro de usinagem (CNC), e equipamento dedicado para estampagem incremental da marca detentora da patente Amino. Concluíram ao final do estudo que os parâmetros de rotação, velocidade, e estratégia de incremento, são os fatores que estão diretamente ligados ao consumo do equipamento. Sendo a estratégia de incremento, um parâmetro com grande potencial para redução de consumo.

Davarpanah e outros autores (2015), estudaram a estampagem incremental em polímeros, avaliando a profundidade máxima de estampagem e a influência da velocidade de rotação do equipamento no acabamento do polímero. Logo concluiu que diferente dos metais, a maior profundidade de estampagem não ocorre para altas velocidade de rotação da ferramenta.

Borrego e outros autores (2016) investigaram a capacidade do processo SPIF de realizar estampagem em uma única etapa, contribuindo para uma melhor compreensão da formabilidade da chapa. Para este fim, foi realizada uma série de testes experimentais com chapa de alumínio de 7075-O. Três ferramentas de raios diferentes foram usadas para estudar o efeito de flexão do material. Logo concluíram que quanto maior o raio da ferramenta, observa-se uma menor espessura da peça estampada e posterior fratura do material. Caso contrário, o estreitamento é completamente inibido. Foi evidenciado o efeito benéfico da velocidade sobre o perfil de espessura, rugosidade superficial e a tensão a qual o material foi submetido.

Mcanulty e outros autores (2016) fizeram análise dos resultados de 35 trabalhos na estampagem incremental, como espessura de peça estampada, diâmetro da ferramenta, velocidade de rotação, velocidade de estampagem, incremento e suas interações. O efeito da espessura do material é consistente em toda a literatura examinada neste trabalho, embora os resultados específicos para cada material possam diferir. A pesquisa apresentada, entretanto, mostra resultados conflitantes sobre o impacto da mudança do diâmetro da ferramenta, provavelmente devido a este parâmetro que afeta o processo de várias maneiras, como condições de fricção, força de deformação e a tensão na interface peça-ferramenta. Maior quantidade de pesquisas faz-se necessária para melhor entendimento, pois a influência da ferramenta não hemisféricas pode ser benéfica para o acabamento

superficial e forças necessárias ao processo. O consenso na literatura foi que a formabilidade melhorou com valores decrescentes, porém deve ser otimizado se o tempo de processo reduzido for requerido. Alguns trabalhos descobriram que os polímeros são afetados por uma pequena variação na temperatura, mais do que os metais, e a formabilidade foi posteriormente reduzida.

No campo da formabilidade Cristino e outros autores (2014), fizeram um trabalho na avaliação do ponto de ruptura, e na curva de fratura na estampagem incremental aplicada a liga de alumínio AA1050-H1111. Logo concluíram que pode-se determinar um novo método de para se obter a curva de fratura, onde é associado a teoria da plasticidade e a curva CLC (curva limite de conformação).

Bagudanch e outros autores (2015), realizaram uma análise de custo e consumo, aplicado a estampagem incremental de policarbonato e Policloreto de Vinila. Na primeira parte de seu estudo foi focado na determinação dos estágios e operações necessárias, em seguida, o consumo de energia em cada estágio. Logo os resultados mostraram que a rotação da ferramenta e velocidade com a qual ela percorre a geometria a ser estampada, foram os parâmetros que tiveram maior consumo de energia do equipamento. Por fim um modelamento matemático que estime o custo de uma peça protótipo foi obtido.

Dongkai e outros pesquisadores (2015) realizaram um trabalho com o objetivo de desenvolvimento de modelos preditivos para estimativa de rugosidade superficial no processo SPIF. A rugosidade da superfície SPIF foi modelada usando três técnicas diferentes, nomeadamente, Redes Neurais Artificiais (ANN), Regressão de Vector de Suporte (SVR) e Programação Genética (GP). No desenvolvimento destes modelos preditivos, o diâmetro da ferramenta, a profundidade do passo, o ângulo da parede, a taxa de alimentação e o tipo de lubrificante foram considerados como variáveis do modelo. A rugosidade superficial média aritmética (R_a) e a altura máxima (R_z) do pico à altura do vale são usadas como variáveis de resposta para avaliar a superficialidade das peças formadas. Os dados necessários para gerar, comparar e avaliar os modelos propostos foram obtidos a partir de experimentos SPIF realizados em fresadora CNC (Computer Numerical Control) usando o projeto Box-Behnken. Os modelos desenvolvidos possuem boa qualidade de ajuste na previsão da rugosidade da superfície. Além disso, o modelo GP tem sido utilizado para a otimização do algoritmo genético de Raand Rzusing. Os parâmetros de processo opti-mum para a rugosidade superficial mínima em SPIF foram obtidos e

validados com os experimentos e encontraram resultados altamente satisfatórios dentro de 10% de erro.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados tópicos de relevância para embasamento sobre as diversas áreas abordadas no desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Conformação de chapas

O processo de conformação mecânica é um dos processos mais antigos de fabricação. É entendido como a modificação de um corpo metálico para outra forma, devido as mudanças dimensionais permanentes, ou seja, deformação plástica, provocadas pela aplicação de forças externas geralmente inferiores a força máxima de resistência do material (DA SILVA, 2015; SILVA, 2011).

Para Stemler (2015), a conformação mecânica não envolve apenas a deformação plástica, elástica da matriz e da peça, outros parâmetros cruciais para o sucesso ou fracasso do processo. Dentre esses outros parâmetros se destaca a variação do comportamento em função da temperatura, o encruamento do material e as condições da interface peça-ferramenta.

De acordo com da Silva (2015) podem ser considerado como processo de conformação: (forjamento, laminação, trefilação, extrusão, e conformação de chapas).

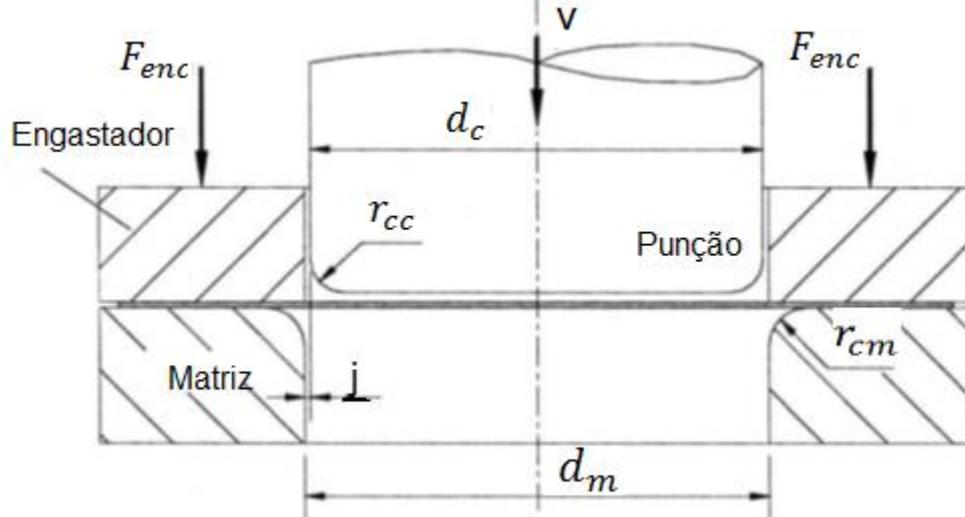
A conformação de chapas conhecida também como estampagem é um processo de fabricação caracterizada por conformar um material de pequena espessura, uma chapa, dando a essa uma forma final (SILVA, 2008).

Conforme Silva (2011) o termo 'estampagem' generaliza várias operações de manufatura, cujo o resultado normalmente são dobras, cavidades, saliência, cunhas e furos. As deformações são realizadas no estado sólido, sendo o material deformado até entrar em regime plástico.

De acordo com Martins (2005) citado por Horta (2015), pode-se considerar o processo convencional de estampagem quando algumas condições são satisfeitas. Na qual uma chapa metálica (ou blank) plano é empurrado até chegar no regime de deformação plástica, pela ação de uma prensa chapas (ou pisador) forçando este material para dentro de uma matriz, através da atuação de um punção. Ao final do processo têm-se a peça com a geometria desejada ou podendo passar por mais

algum outro processo de produção, como por rebarbamento e corte pelo processo de cisalhamento. Este modelo é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Esquemático do processo convencional



Fonte: RODRIGUES; MARTINS, 2005,p. 437.

Onde:

- a. d_c : diâmetro do punção (ou cunho);
- b. d_m : diâmetro da matriz;
- c. j : folga radial entre o punção e a matriz (geralmente superior à espessura inicial da chapa);
- d. r_{cc} : raio de canto do punção (ou cunho);
- e. r_{cm} : raio de canto da matriz;
- f. F_{enc} : força aplicada pelo prensa-chapas (ou encostador);
- g. v : velocidade do punção.

O processo pode ser descrito a seguir:

- a) O prensa chapa desloca ao encontro da chapa, exercendo uma força F_{enc} :, em seguida o punção avança com uma velocidade v sobre a chapa. A partir desse momento o material passa pelos regimes elástico e plástico, diminuindo a espessura;
- b) Com o avanço do punção, a região da aba entra em movimento, nesse ponto considera se primeiro estágio da estampagem;

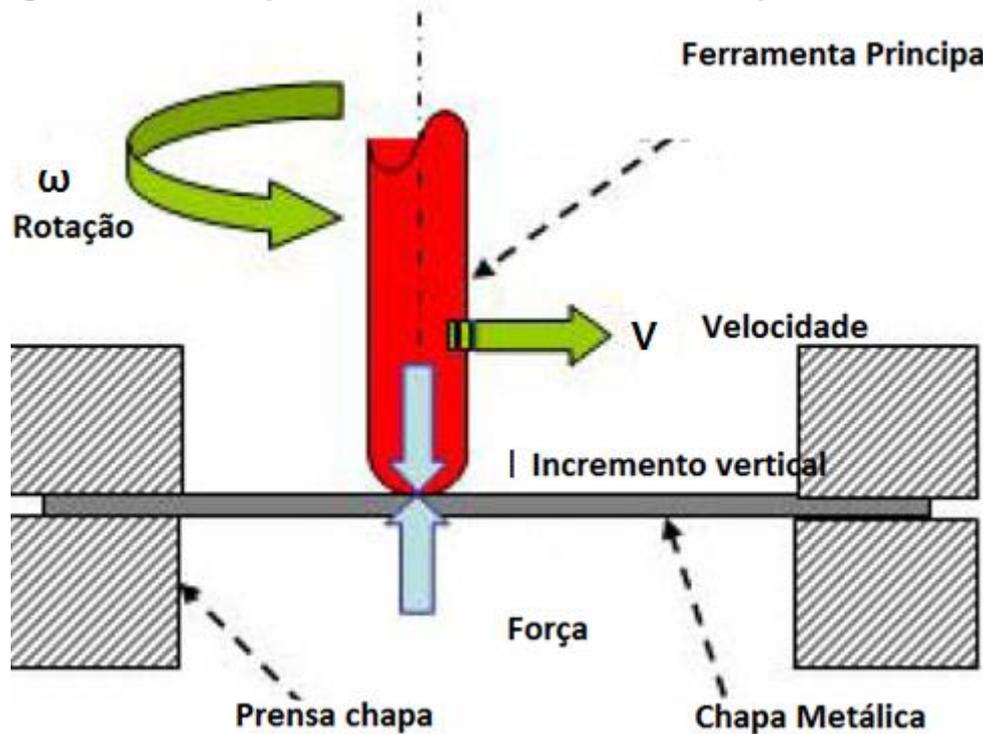
- c) Pode-se considerar o início da segunda fase quando o material se encontra na região plástica, onde a quantidade de material puxado para dentro da matriz fica cada vez menor. O final da segunda fase é considerado quando o material preenche toda a cavidade da matriz.

3.2 Estampagem Incremental

De acordo com Rodrigues (2013) nas últimas décadas a indústria tem buscado novas tecnologias para a produção de produtos com um menor tempo possível e custo. No processo convencional de estampagem, quando é necessário a produção de um novo modelo de peça ou produto é necessária a construção de uma nova matriz, que em alguns casos leva a grandes investimentos.

Conforme Jeswiet (2001) citado por Patrício (2011), o processo é principalmente utilizado para estampar materiais metálicos sem uso de matrizes complexas, utilizando para isto uma ferramenta metálica de contato pontual, montada num centro de usinagem ou equipamento específico, com o objetivo de obter a deformação através do movimento da peça e/ou da ferramenta principal no plano vertical. Uma das principais variáveis que se pode controlar a partir do equipamento CNC são: ω que é a rotação dada em (RPM), V velocidade (m/min), e I incremento vertical (mm), a Figura 2 ilustra essas variáveis.

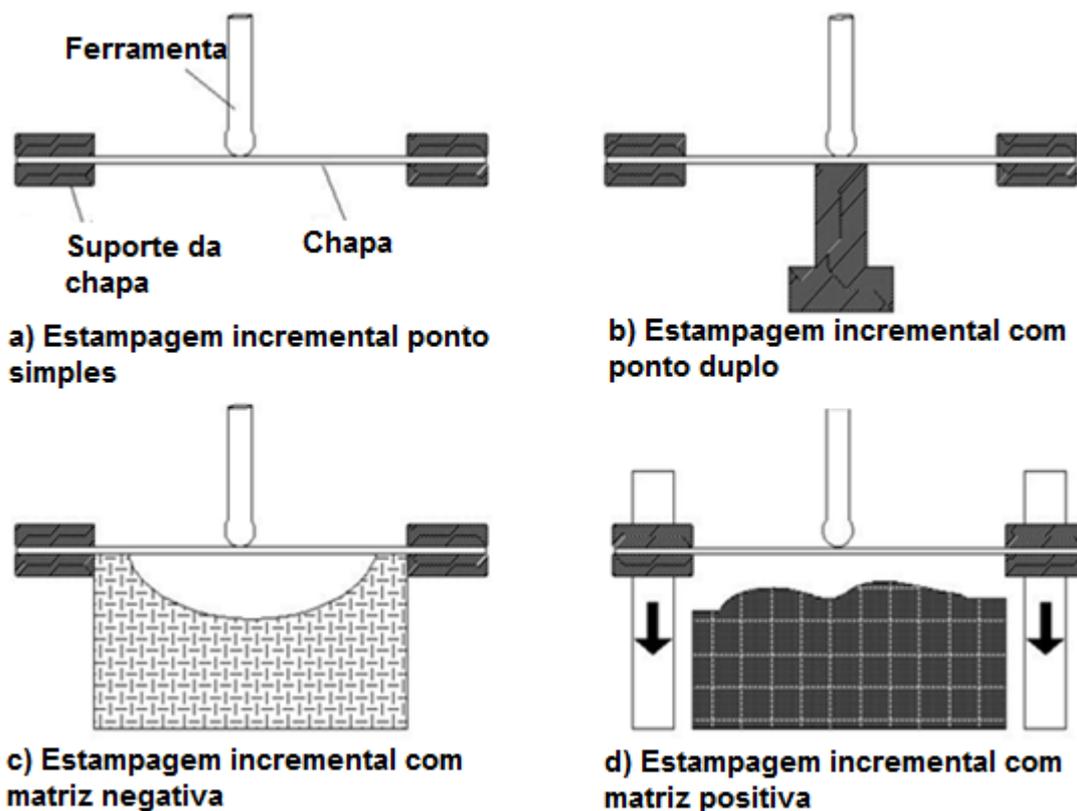
Figura 2 - Principais movimentos realizados pela ferramenta



Fonte: Adaptado de JESWIET (2001).

Segundo Patrício (2011) o Single Point Incremental Forming (SPIF) é conhecido como contato único entre a ferramenta e Two Point Incremental Forming (TPIF) conhecido como duplo contato entre a ferramenta e a peça. Ainda se a peça for conformada interna ou externamente, o processo pode ser chamado negativo ou positivo. Pela Figura 3 é possível visualizar os tipos de classificação.

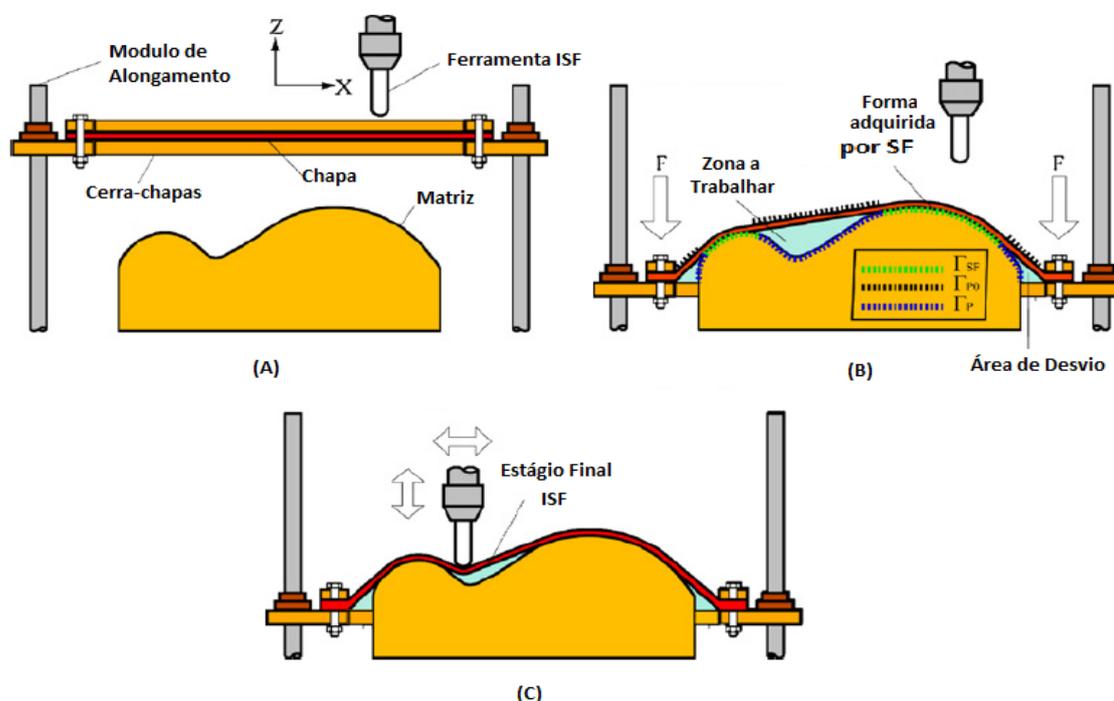
Figura 3 - Diferentes configurações do ISF. a) ponto simples – sem apoio inferior; b) ponto duplo com apoio; c) ferramenta inferior com cavidade; d) ferramenta inferior com saliência.



Fonte: Adaptado de SILVA (2010).

Segundo Rodrigues (2013) o avanço da tecnologia de estampagem possibilitou a utilização de dois processos convencionais, surgindo uma nova possibilidade que é a estampagem incremental híbrida, onde é associado a estampagem convencional com a incremental. A Figura 4 ilustra os processos.

Figura 4 – Estampagem Incremental Híbrida Princípio do processo de combinação SF+ISF, (A) Instalação; (B) Processo SF; (C) Processo ISF.



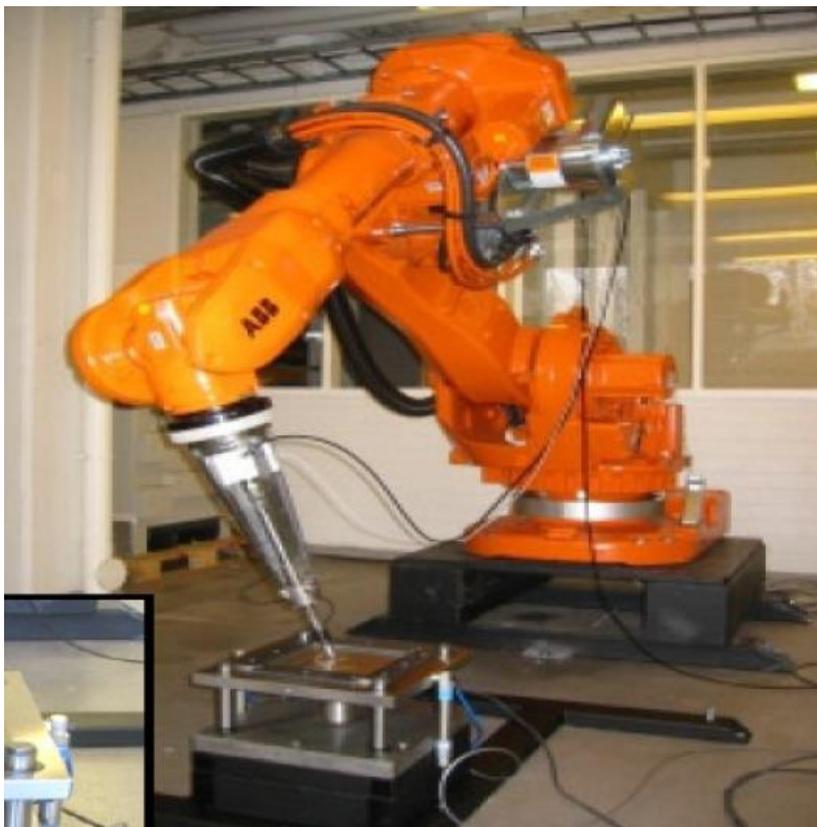
Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2013)

3.2.1 Máquinas para estampagem incremental

Segundo Daleffe (2008), se tem utilizado 3 tipos de equipamento para promover a estampagem incremental, sendo robô, máquina de usinagem CNC, e máquina dedicada. O processo se inicia com a construção de um modelo em 3D (Três dimensões) em CAD (Projeto Assistido por Computador) da peça; posteriormente este programa é transferido para uma outra plataforma CAM (Computer Aided Manufacturing) e nesta plataforma é feita a estratégia de estampagem, como definição da ferramenta, velocidade e outros parâmetros do processo. Por fim o programa é convertido em linguagem de máquina e executado.

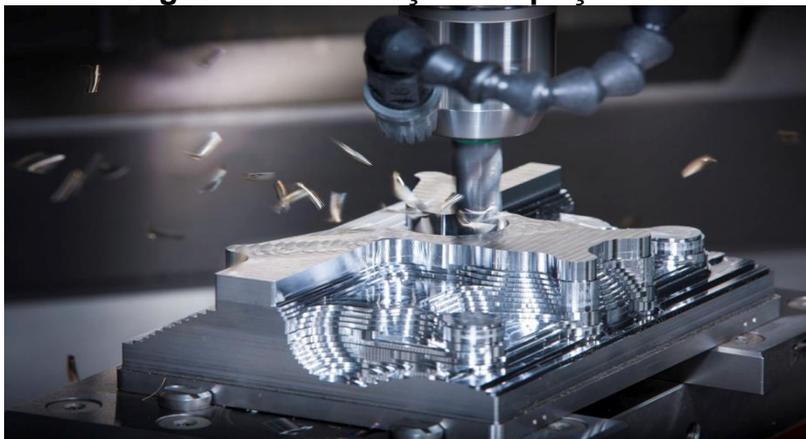
Conforme Dallefe (2008), a utilização de robôs traz uma maior flexibilidade no processo, uma vez que estes podem ser integrados a outros processos como um posicionamento em um corte a laser e posterior um tratamento térmico superficial como é possível observar na Figura 5.

Figura 5 - Robô utilizado na estampagem incremental



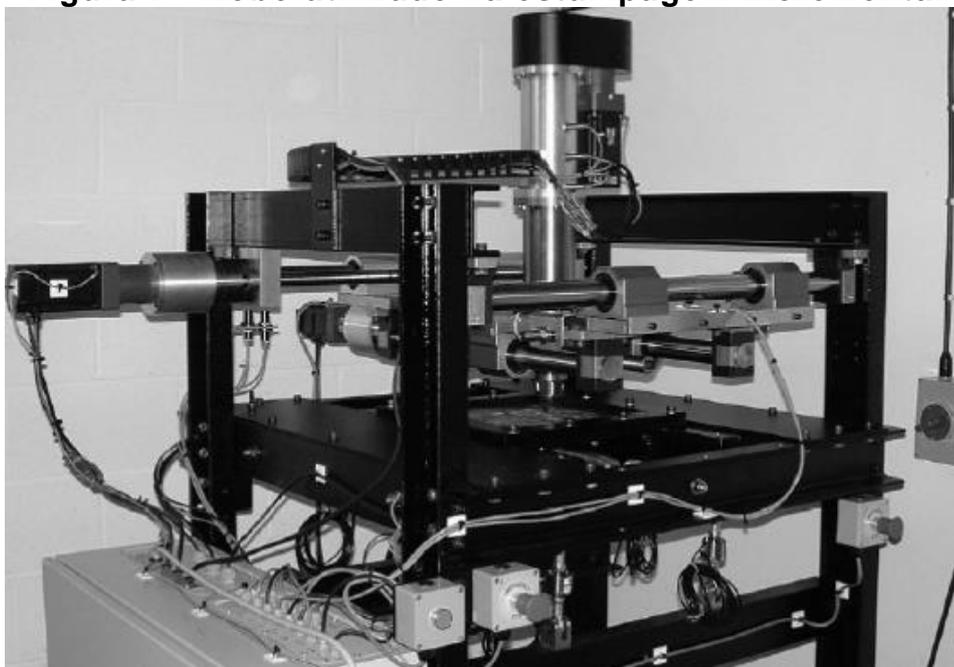
Fonte: Adaptado de DALEFFE (2008).

Máquinas de usinagem CNC têm sido utilizadas por apresentarem custo atrativo e possibilitar a utilização em outras funções, na Figura 6 é exemplificada a utilização do equipamento para produção de peças seriadas. Especial atenção deve ser dada a carga de trabalho, pois o eixo árvore não é fabricado para suportar elevadas cargas, além de não apresentar um instrumento de medição de força, logo existe um limitador.

Figura 6 - Produção de peça CNC

Fonte: Elaborada pelo autor

Máquinas dedicadas têm um melhor aproveitamento das funções existentes, além de ter outras funções não presentes em máquinas de usinagem e robôs, mas apresenta por outro lado alto custo e pouco flexibilidade para utilização em outros processos, a Figura 7 ilustra o equipamento.

Figura 7 - Robô utilizado na estampagem incremental

Fonte: Adaptado de DALEFFE (2008)

3.2.2 Ferramentas para estampagem incremental

As ferramentas utilizadas no processo de estampagem incremental são geralmente de aço-ferramenta ou outro material mais duro que a peça a ser deformada. Tem a ponta esférica, e pode estar ou não fixa diretamente na ferramenta.

Segundo Daleffe (2008), o menor diâmetro que se tem relato é de 6mm. O diâmetro está diretamente ligado ao acabamento superficial, a Figura 8 mostra os diferentes diâmetros. A força necessária para a estampagem está ligada ao material utilizado e a espessura do material a ser deformado.

De acordo com Lopes (2013) a escolha do diâmetro da ferramenta está ligado principalmente no raio côncavo presente na peça. Os diâmetros mais utilizados são por volta de 11mm a 12,5mm. Quando a ponta é rotativa possibilita a rotação em todas as direções diminuindo assim o atrito.

Figura 8 - Ferramentas com diferentes diâmetros



Fonte: Adaptado de DALEFFE (2008).

A Tabela 1 apresenta valores de acabamento superficial obtidos para diferentes condições de diâmetro de ferramenta, conforme estudos realizados por diferentes autores.

Tabela 1 - Valores de Rugosidade Superficial

Autor	Ano	Material	Lubrificante	Diâmetro da ferramenta(mm)	Esp.(mm)	Vel.(mm/min)	Incr.(mm)	Rot.(RPM)	Ra(μm)	Rz(μm)
Daleffe	2008	Alumínio	Graxa a base de lítio	10	1	1500	0,3	2000	-	0,69
				15					-	0,87
				20					-	1,43
Silva	2011	Aço 1008	Oléo hidráulico 150 VG 32	14,2	0,9	720	0,2	1000	5,48	31,51
						1440			4,13	24,45
						2160			3,89	23,09
						720	0,4		6,17	38,36
						1440			4,72	27,01
						2160			3,97	27,53
Maciel	2015	FEP 02	Sem lubrificação	12	0,8	1500	0,5	50	1,797	2,33
			Vaselina						0,708	0,912
			Grafite						2,78	3,44
			MQF						1,48	1,83
			Cera Automotiva						1,79	1,94

Fonte: Adaptado de MACIEL (2015)

3.2.3 Aplicação dos produtos da estampagem incremental

Segundo Rodrigues (2013) na linha automotiva o processo é utilizado para criação de protótipos de peça a ser estampada como para-lama, para-choque, capô, e suporte do farol como é possível observar na Figura 9.

Figura 9 - Geometrias variadas

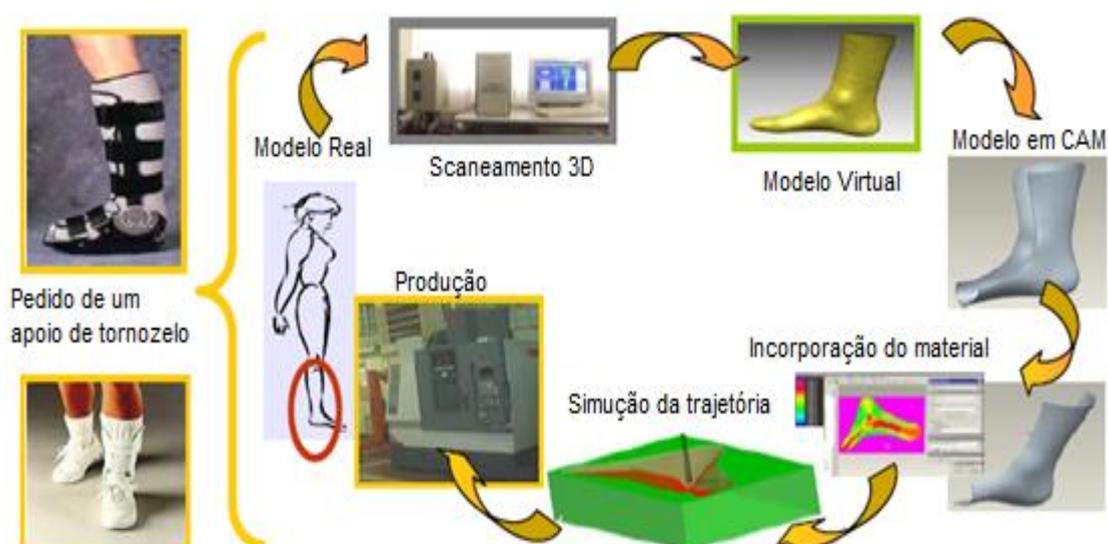
Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2013).

Na indústria aero espacial é muito utilizado o processo por estampagem incremental por ser flexível podendo ter peças únicas, principalmente pequenos tubos de ventilação como exemplificado na Figura 10.

Figura 10 - Geometrias variadas

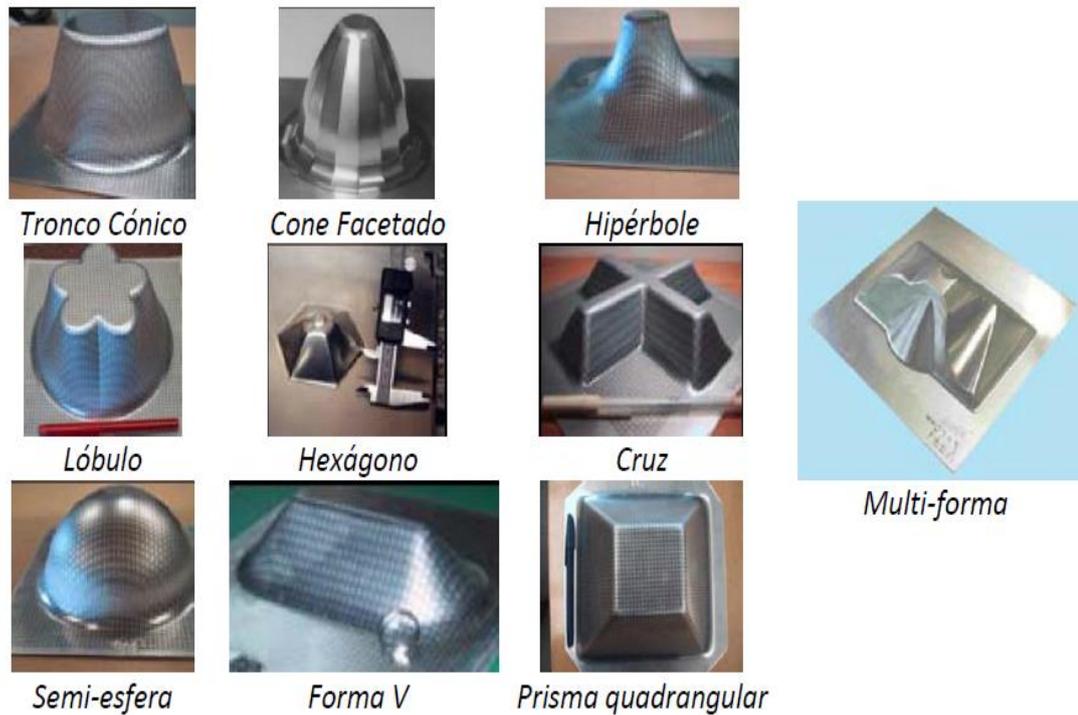
Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2013).

Na área da medicina, a estampagem incremental possibilitou a confecção de próteses semelhante aos membros perdidos com grau de precisão elevado. A Figura 11 apresenta algumas aplicações.

Figura 11 Figura 11 – Aplicação medicina

Fonte: Adaptado de JESWIET (2001)

De acordo com Rodrigues (2013), o processo de ISF não utiliza necessariamente uma matriz, logo possibilita a produção de peças com geometria complexas como exemplificado na Figura 12.

Figura 12 - Geometrias variadas

Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2013)

3.3 Limites de Geometria

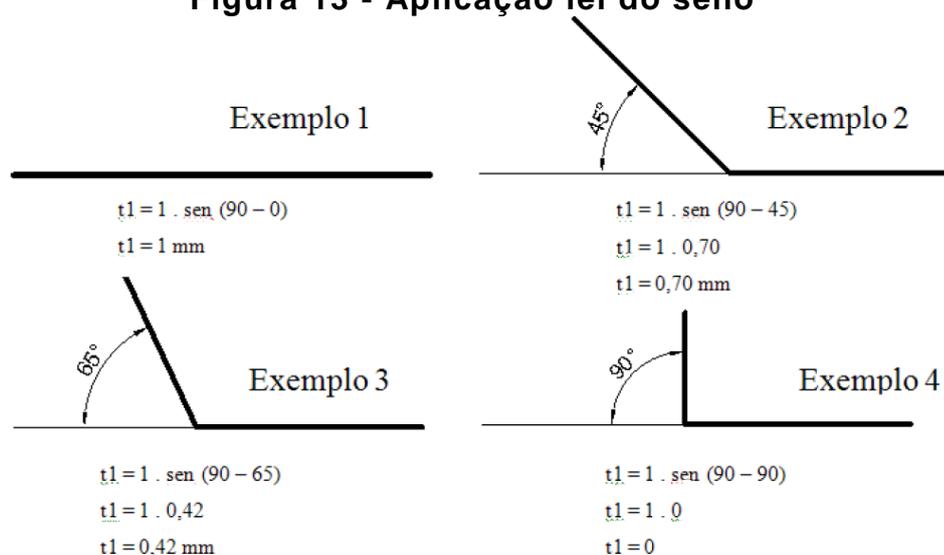
Conforme Patrício (2011) nos processos de conformação (forjamento, estampagem convencional), existem certos limites de deformação que não devem ser ultrapassados, para que não ocorram defeitos como fraturas, dobras, estrias, e possível diminuição da espessura.

O ângulo máximo de estampagem é determinado por uma relação direta entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação. Isso é demonstrado pela Equação 1, conhecida como lei dos senos.

$$T_1 = T_0 \text{sen}(90 - \varphi) \quad (1)$$

Onde T_0 é a espessura inicial da chapa, T_1 espessura da chapa medida em determinado estágio do processo de conformação e φ é o ângulo de inclinação da chapa. Na Figura 13 é mostrado exemplos de como é feito a aplicação da equação e o que significa cada parâmetro.

Figura 13 - Aplicação lei do seno



Fonte: Adaptado de DALEFFE (2008).

3.4 Limites da ferramenta

Segundo Rodrigues (2013) e outros autores do assunto são unânimes em afirmar que quanto maior o diâmetro da ferramenta melhor é o acabamento superficial, mas por outro lado o diâmetro muito elevado causa uma dificuldade na execução de detalhes finos na peça a Tabela 2 mostra os respectivos diâmetro utilizado por cada autor.

Tabela 2 - Diâmetro da ferramenta (mm)

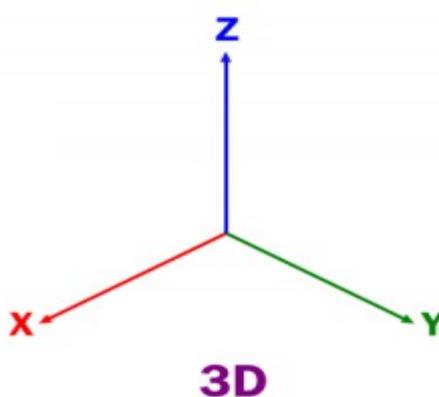
Investigadores	Ano	Diâmetro da ferramenta (mm)
Kim e Park	2002	5, 10 e 15
Lamminem	2003	10 e 20
Hirt		6, 10 e 30
Carrino	2004	5 e 10
Pohlak		12 e 20
AllWood	2005	10, 20 e 30
Duflou		12,7
Jeswiet		12 e 12,5
Ambrógio	2006	10 e 20
Ambrógio	2007	12 e 24
Duflou		10

Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2013)

3.5 Limites do incremento vertical

Segundo Rodrigues (2013) o processo de estampagem incremental é baseado em 3 eixos principais x, y, e z. O eixo x está no plano horizontal, o eixo y corresponde a profundidade, por fim o eixo z é a altura. O incremento vertical está ligado ao quanto a ferramenta vai deslocar no plano Z, pela Figura 14 é possível observar os 3 três eixos no plano cartesiano.

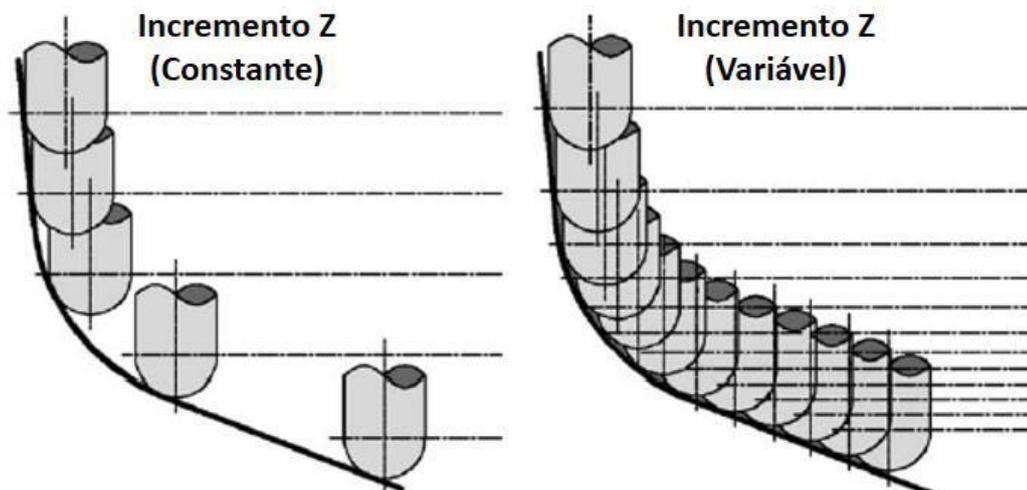
Figura 14 - Incrementos verticais



Fonte: Adaptado de ARFA (2013).

Pode-se variar este incremento em constante e variável. A Figura 15 ilustra as duas formas de incremento.

Figura 15 - Incrementos verticais



Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2013).

De acordo com Attanasio, Ceretti e Giardini (2006) citado por Rodrigues (2013) o método por incremento vertical constante apresenta algumas desvantagens em relação ao variável, quando se comparado o acabamento superficial. Além disso quanto menor o ângulo de inclinação da superfície menores são o deslocamento vertical e horizontal melhor é o acabamento superficial. Conforme Yanle (2014) a força de estampagem é proporcional ao incremento vertical, sendo um fator determinante na detecção de falhas.

3.6 Influência da velocidade de rotação da ferramenta

Segundo Rodrigues (2013) a velocidade de rotação provoca um aquecimento na interface ferramenta peça; este aquecimento favorece a diminuição da tensão de escoamento do material, favorecendo assim a conformação e um melhor acabamento superficial.

Segundo Lopes (2013) o aumento da velocidade de rotação ocasiona um aspecto negativo que é o desgaste da ferramenta acelerado e alguns lubrificantes tendem a entrar em combustão, criando problema de segurança e ambiental.

3.7 Influência da velocidade de avanço

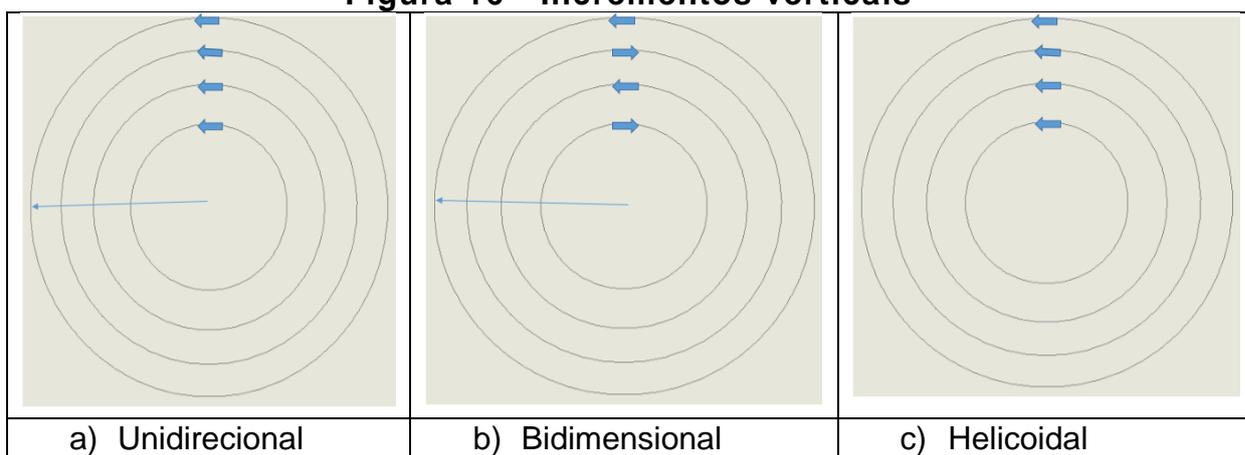
Segundo Rodrigues (2013) a velocidade de avanço é considerada a velocidade a qual a ferramenta percorre o caminho da peça a ser deformada. Quanto maior for a velocidade de avanço pior será o acabamento superficial, pois o aumento da velocidade aumenta a temperatura no ponto de contato provocando um aumento do atrito. Além disso este parâmetro tem grande influência no tempo de conformação, sendo muito dependente do equipamento utilizado. Normalmente as velocidades mais comuns utilizadas então na faixa de 500 a 4000 m/min.

3.8 Trajetória da ferramenta

De acordo com Lopes (2013), a geração do caminho ao qual a ferramenta irá percorrer é um dos principais fatores no processo. Sendo que para definir a trajetória a ser utilizada primeiro deve-se conhecer as características do material. Quanto a trajetória ela pode ser dividida em 3 grupos:

- a) **Trajétória unidirecional de incremento:** é a técnica a qual a ponta da ferramenta movimenta-se no contorno da peça. Sendo que deixa marcas no ponto de transição e cria pico de força. A Figura 16 letra a) ilustra o movimento;
- b) **Trajétória bidimensional de incremento constante:** é semelhante ao unidirecional de incremento, diferenciando na transição entre uma camada e outra. A ferramenta passa do sentido horário para o anti-horário, a Figura 16 letra b) ilustra a trajetória;
- c) **Trajétória da ferramenta em espiral:** a trajetória percorrida pela ferramenta é helicoidal, apresentando um acabamento superficial melhor do que o incremental e remoção das linhas de incremento. Figura 16 letra c).

Figura 16 - Incrementos verticais



Fonte: Elaborado pelo autor

3.9 Estudos referente a simulação numérica da estampagem incremental

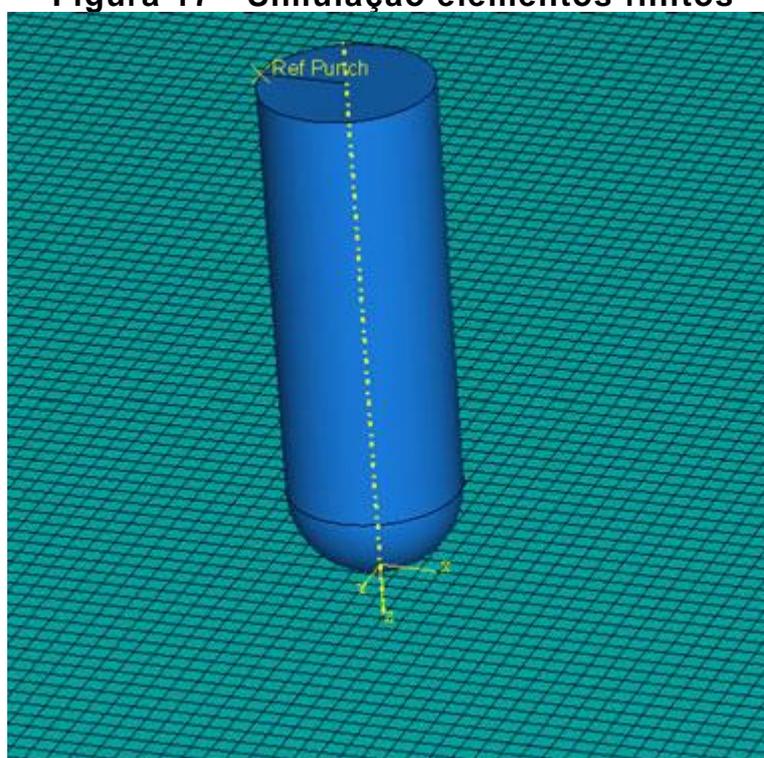
De acordo com Rodrigues (2013) com o avanço dos *softwares* de simulação que tem como ferramenta o método de elementos finitos (MEF) possibilitou ganho no tempo de fabricação e no número de peças a ser feito até que se tenha resultado da peça final.

O processo passa por basicamente 3 fases: Primeiro um pré-processamento onde são feitas as definições de material, geometria e tipo de malha a ser utilizada. Uma segunda fase é a análise onde é definido as condições de fronteira como força aplicada, zonas de engastamento e etc. Por fim o pós-processamento onde é

realizado a leitura dos dados finais o qual representa com exatidão os resultados reais, mas com ressalva das fases 1 e 2 serem bem definidos.

De acordo com Arfa (2013) o método por elementos finitos se aplicou na estampagem incremental pela necessidade de prever possíveis falhas ou regiões com defeitos, além de reduzir o tempo entre tentativa e erro na indústria. Em seu trabalho buscou realizar a comparação entre os parâmetros de força de deformação, a espessura final, distribuição da deformação plástica, e o volume da peça em uma liga de alumínio Al 3003 utilizando o programa ABAQUS com o experimental. A Figura 17 ilustra a ferramenta sobre a chapa discretizada.

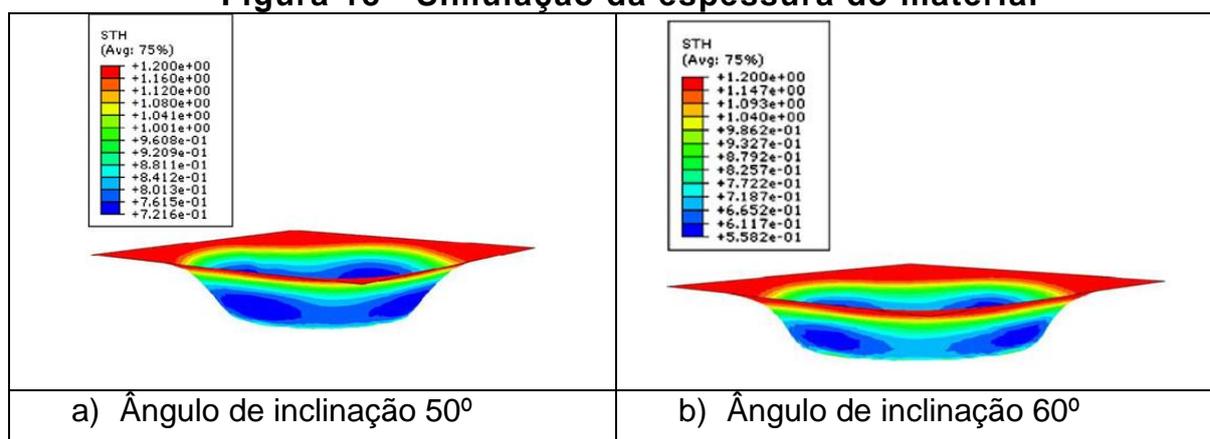
Figura 17 - Simulação elementos finitos



Fonte: ARFA (2013)

A Figura 18 ilustra o resultado encontrado da simulação de um processo de estampagem incremental onde houve a variação do ângulo, observa-se que houve uma diminuição da espessura no fundo do modelo, à medida que houve uma variação do ângulo.

Figura 18 - Simulação da espessura do material



Fonte: ARFA (2013).

3.10 Tipos de materiais aplicados na estampagem

Um dos fatores importante na estampagem incremental é o ângulo máximo de trabalho, aquele o qual o material deforma sem sofrer o rompimento, Jeswiet (2004) realizou uma pesquisa em trabalhos publicados sobre os ângulos e espessura para cada material aplicado ao processo de estampagem incremental, onde as principais causas desse ângulo máximo estão relacionadas com a espessura do material e o tipo, de acordo com a Tabela 3:

Tabela 3 - Materiais

Material	φ_{\max}	t_0 (mm)	Autor	Ano
AAV1050 – O	67,5°	1,21	Filice	2002
Al 3003 – O	78,1°	2,1	Jeswiet	2005
Al 3003 – O	72,1°	1,3		
Al 3003 – O	67°	1,21		
Al 3003 – O	62°	0,93		
Al 5754 – O	62°	1,02		
Al 5182 – O	63°	0,93		
AA 6111 -T4P	53°	1		
DC04, Laminado a frio	65°	1	Hirt	2003
DDQ	70°	1	Micari	2004
HSS	65°	1		
Cobre	65°	1		
Latão	65°	1		
AA 6114 - T4	60°	1		

Fonte: Adaptado JESWIET (2004)

A Tabela 4 indica os materiais com sua respectiva espessura e o ângulo máximo alcançado conforme estudos recentes.

Tabela 4 - Estudos recentes de materiais

Material	φ_{\max}	t_0 (mm)	Autor	Ano
ABNT Aço 1008	45°	0,9	Silva	2011
ABNT Aço inox 304	55°	0,9		
FEP04 (EEP)	75°	0,7	Patrício	2011
AISI 304	33°	0,8	Horta	2015

Fonte: Elaborado pelo autor

3.11 Atrito na Estampagem incremental

De acordo com Arnold (1992), o atrito pode ser considerado como a resistência que dois corpos tem em movimentar em sobre o outro. Os corpos podem ser gás e um sólido, líquido e um sólido ou sólido e um sólido. O atrito desempenha um papel muito importante em nossa vida e nos processos industriais, sem o atrito não poderia mover-se pelo solo, segurar um objeto, acender um fósforo, e um tanto de outras atividades comuns. Sem o atrito, as juntas de roscas não iriam segurar eixos de laminadores em mancais, solda por fricção não existiria, nem música de violino.

De acordo com Folle (2012), o estudo do coeficiente de atrito na estampagem é de suma importância na construção de ferramentas e validação de uma simulação numérica. Ainda segundo o autor, o atrito na conformação ocorre quando há um movimento relativo entre uma ferramenta sobre uma peça deformada. O atrito pode ser um problema na conformação quando causa desgaste prematuro de ferramentas e elevado consumo de energia desnecessário, sendo que as vezes o problema pode ser resolvido apenas com a mudança do tipo de lubrificação utilizado.

Já o atrito em outros processos como na laminação é essencial para ocorrer a “mordida” da barra pelos cilindros, e até mesmo na estampagem tem papel de prevenir defeitos como enrugamento.

Para Folle (2012), geralmente nos processos industriais utilizam um filme de óleo lubrificante em excesso para prevenir desgaste prematuro de matrizes e “arranhões” em chapas. Porém, o mercado e as legislações ambientais estão mais exigentes, procurando sempre um local de trabalho cada vez mais limpo e uma menor degradação do meio ambiente.

As principais vantagens em se utilizar lubrificantes são:

- a) Diminuição das forças necessária para operação de estampagem, a força de atrito é menor em superfícies lubrificadas do que sem lubrificação;
- b) Prevenção do desgaste das matrizes causadas por adesão ou abrasão das superfícies;
- c) Garantia da qualidade do produto final.

O Controle do atrito tem função primordial na distribuição das tensões e deformações da chapa. Uma falta de atrito pode ocasionar o aparecimento de rugas na peça final. Um elevada força de atrito pode gerar o aparecimento de trincas na peça (FOLLE, 2012).

3.12 Desgaste por deslizamento

Conforme Arnold (1992), o desgaste por deslizamento refere-se a um tipo de desgaste geralmente de um sólido sobre outra superfície sólida. Outros tipos de desgaste como erosão, cavitação, contato por rolagem, abrasão, oxidação, e vibração, são os mais tradicionais e excluem o clássico desgaste por escorregamento.

De acordo com Bhushan (2013) uns dos primeiros pesquisadores a propor o atrito por deslizamento foi Coulomb, que propôs que o atrito por deslizamento é devido a aspereza ou irregularidade entre o contato de superfícies.

A energia requerida é dada por micro deformações entre as duas superfícies em movimento, caso uma das superfícies se deforme plasticamente possivelmente irar deixar marcas ou arranhões.

De acordo com Bhushan (2013), se assumir a existência de interações no processo de deslizamento como sendo de caractere de deformação e adesão. Pode-se chamar de F_i a força de fricção que é a somatória da força de adesão F_a e F_d a força de deformação como na Equação 2.

$$F_i = F_a + F_d \quad (2)$$

Conforme Bhushan (2013), pode-se considerar que o coeficiente de atrito por deslizamento μ_i é o somatório de deformação μ_d e aderência μ_a . Sendo apresentado pela Equação 3:

$$\mu_i = \mu_a + \mu_d \quad (3)$$

De acordo com Arnold (1992), para análise deste tipo de desgaste deve-se considerar uma superfície limpa e seca, sem contaminação com meios externos, porém esta condição é pouco provável na prática. Pode-se definir assim condições normais de deslizamento para três classes de materiais (metais, polímeros e cerâmicos).

Quando duas superfícies deslizam uma sobre a outra, haverá contato entre sólido (óxidos, sulfuretos e assim por diante). Se a pressão de contato for alta a camada sólida pode fraturar e expor a camada do substrato. Na região de interface entre os 2 materiais pode ocorrer uma união, quando se tem metais idênticos como mesma liga de aço. Metais diferentes tendem a relacionar com menor força. Já partes de estrutura atômica iônica ou covalente idênticas, tais como material cerâmico tendem a se ter uma união estável. A seleção do material para este tipo de desgaste deve ser cuidadosa, uma vez que os aços variam amplamente suas propriedades com o tratamento térmico. Normalmente os polímeros são mais utilizados, pois são inertes quimicamente, e são auto-lubrificantes. Matérias cerâmicos são utilizados onde não há alta temperatura, ou locais onde sem tem gases e óxidos.

3.13 Desgaste por rolamento

De acordo com Aronld (1992), o desgaste por rolamento acontece quando dois corpos passam a rolar um sobre o outro. Este tipo de desgaste é uma das principais causas de falha em rolamentos, dente de engrenagem, guias, motores de combustão interna, e cilindro de laminação. Estudos mostram que é difícil detecção no início do processo.

É um tipo de desgaste que pode surgir debaixo da superfície, que com o tempo pode surgir crateras que podem danificar o equipamento. A principal característica do aparecimento do desgaste é o aumento progressivo do barulho, aquecimento do sistema, aumento de vibrações, aparecimento de resíduos no óleo e

defeitos em matéria prima de laminadores. O desgaste por rolamento difere dos outros tipos de desgaste por apresentar uma vida de centenas, milhares ou milhões de ciclos sem remoção de partículas, sendo que frequentemente é acompanhado pelo desgaste de deslizamento.

O mecanismo de abrasividade inicia na superfície do material, forçando a uma deformação elástica até a deformação plástica, com a excessiva repetição ocorre a fadiga desta região até a fratura.

De acordo com Bhusham (2013), é mais fácil rolar uma superfície do que deslizar. O atrito por rolamento é a resistência que uma superfície exerce sobre a outra em um movimento, o termo atrito por rolamento é geralmente restrito a corpos com rugosidade superficial bem baixa. Para metais duros, o coeficiente de atrito por rolamento entre corpos cilíndricos e esféricos geralmente estão na faixa de 5×10^{-3} a 10^{-5} . Durante o rolamento de duas superfícies uma contra a outra, há uma combinação de movimentos de rotação, deslizamento e rolamento. Este tipo de atrito é muito afetado pela utilização de lubrificantes.

A velocidade de deslizamento é geralmente 10% da velocidade de rolamento ou menos. Sendo μ_r o coeficiente de atrito por rolamento, V_s velocidade de deslizamento, V_r velocidade de rolamento, e μ_k o coeficiente de atrito cinemático, Equação 4 ilustra as variáveis citadas:

$$\mu_r = \frac{V_s}{V_r} * \mu_k \quad (4)$$

Por fim, vários fatores podem influenciar a perda por atrito, como falta de circularidade, presença de partículas contaminantes na interface.

3.14 Lubrificantes e lubrificação na estampagem incremental

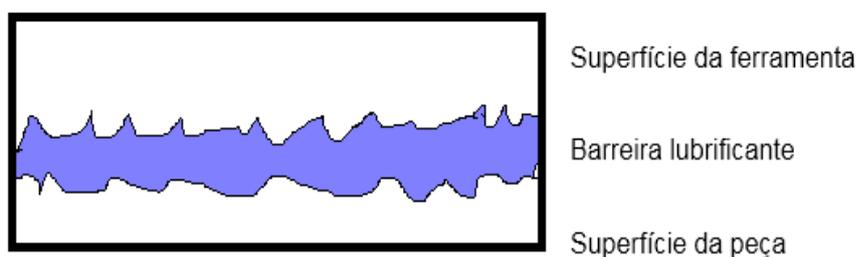
Lubrificante é todo ou qualquer material sólido ou líquido de baixa resistência ao cisalhamento, cuja função é a de manter separadas as superfícies de trabalho.

O desempenho dos lubrificantes na estampagem de peças pode ter um impacto significativo no processo, como em algumas aplicações de embutimento e estiramento.

Dieter (1996) afirma que os lubrificantes reduzem o atrito por introduzirem uma interface que seja facilmente cisalhada.

Keeler (2001) define uma barreira lubrificante como sendo um filme que isola completamente a superfície da chapa metálica da superfície da matriz conforme Figura 19. Para que esta camada seja formada eficientemente, algumas propriedades devem ser levadas em conta.

Figura 19 - Esquema da barreira lubrificante isolando a superfície da ferramenta com superfície da chapa metálica



Fonte: Adaptado de KEELER (2001)

Parâmetros tais como viscosidade, molhabilidade, aditivos de extrema pressão e refrigeração eficiente podem afetar significativamente a vida da ferramenta, qualidade da peça, limite de conformação e em geral a produtividade.

Segundo Kren (2004), projeto e material da ferramenta, material da peça, equipamento, método de aplicação e operações de pré e pós-processo, afetam o desempenho do lubrificante.

Segundo Altanetal (1983) e Kobayashi et al (1989), nos processos de conformação, o escoamento do material é causado pela pressão transmitida pela matriz para a peça conformada. Portanto, as condições de atrito na interface matriz material têm influência no escoamento do metal, formação de defeitos superficiais e internos, tensões e forças atuantes no processo.

Para otimizar a performance da ferramenta, segundo Altan et al (2005), deve-se avaliar o desempenho das funções básicas dos lubrificantes: controlar o atrito e conseqüentemente reduzir o desgaste da ferramenta, prevenir contra “galling” (aderência progressiva do material da peça na ferramenta), reduzir os esforços necessários à conformação, diminuir as etapas de estampagem, aumentar os limites de deformação, proteger contra corrosão e dissipar o calor. Os primeiros são

realizados utilizando mecanismos de lubrificação. O calor é dissipado através do veículo usado para transporte do lubrificante.

Sob condições a seco nenhum lubrificante é utilizado na interface e somente as camadas de óxidos presentes na matriz e na matéria-prima estão presentes. Neste caso, o atrito é elevado, situação desejável em pequeno número de operações de conformação.

Os três mecanismos de lubrificação, segundo Trivettetal (2004), são:

- a) Lubrificação hidrodinâmica;
- b) Lubrificação limite;
- c) Lubrificação EP (Extrema Pressão).

As condições hidrodinâmicas, segundo Klann (2000), existem quando uma espessa camada de lubrificante está presente entre as matrizes e a peça. Embora funcione como lubrificação no motor automotivo, contribui pouco na estampagem. A eficácia da lubrificação hidrodinâmica diminui com o aumento da força e a temperatura entre as superfícies. Tipicamente, a temperatura e a pressão existente na interface da peça com a ferramenta nas operações de estampagem ultrapassam o limite de resistência da lubrificação hidrodinâmica, então lubrificação limite, lubrificação EP ou uma combinação destas é requerida. Segundo Trivettetal (2004), a lubrificação hidrodinâmica age como um filme que separa as superfícies da peça da ferramenta em condições de baixa pressão.

Segundo Trivettetal (2004), a lubrificação limite é realizada usando aditivos polares ou emulsificantes, que tenham atração com a superfície do metal. Esta afinidade promove uma barreira que protege a ferramenta e a peça.

Lubrificação limite pode ter derivados gordurosos, como banha de porco, álcool gorduroso, entre outros. Aditivos polares, adicionados para agirem como um mecanismo lubrificante acentuam também a característica de molhabilidade do lubrificante, assegurando uma camada contínua na superfície do metal. Lubrificação limite, segundo Klann (2000), representa uma importante função na estampagem com lubrificante, mas gorduras e sabões são ineficientes principalmente acima dos 100°C, então eles são usados em combinação com os lubrificantes EP.

Lubrificação de extrema pressão EP são dois tipos: mecânica e química. Ambas podem separar eficientemente a ferramenta da peça controlando o atrito,

reduzindo o desgaste da ferramenta, prevenindo “galling” e aumentando os limites de conformação. Aditivos típicos EP são carbonato de cálcio e bissulfeto de molibdênio. Infelizmente filmes mecânicos tendem a desenvolver sujeira no equipamento e são incompatíveis com o pós-processo. Evidentemente, estarão presentes, impregnados, em ferramentas com geometria mais complexa.

Segundo Godwin (2004), aditivos EP químicos tal como enxofre, cloro ou fósforo são utilizados mais frequentemente. Eles reagem na interface ferramenta-peça, formando sais metálicos agindo como superfície de sacrifício. Cloro é adicionado no lubrificante para estampagem para formar hidrocarbonetos de cloro. Durante a estampagem o calor gerado na interface da ferramenta-peça libera o cloro que reage com o ferro formando um filme de cloreto de ferro, um excelente lubrificante EP.

Similarmente, enxofre é adicionado para sulfurizar o óleo mineral ou ésteres gordurosos, inclusive banha de porco. Neste caso, a reação química durante a estampagem resulta em um filme de sulfeto de ferro.

Cada aditivo tem uma faixa de temperatura, com um limite, onde é mais efetivo. Existem algumas operações de estampagem mais severas que requerem uma combinação de vários lubrificantes para ser mais efetivo.

Os requisitos EP, segundo Klann (2000), para uma variedade de metais para conformação e operações de estampagem, podem ser completamente diferentes. Por exemplo, embora uma simples operação de furação pode ser realizada sem aditivos químicos EP, o uso de cloro, fósforo, ou enxofre pode aumentar significativamente a vida da ferramenta. O filme químico protege o punção principalmente durante o retorno, onde ocorre o maior desgaste devido ao retorno elástico da peça.

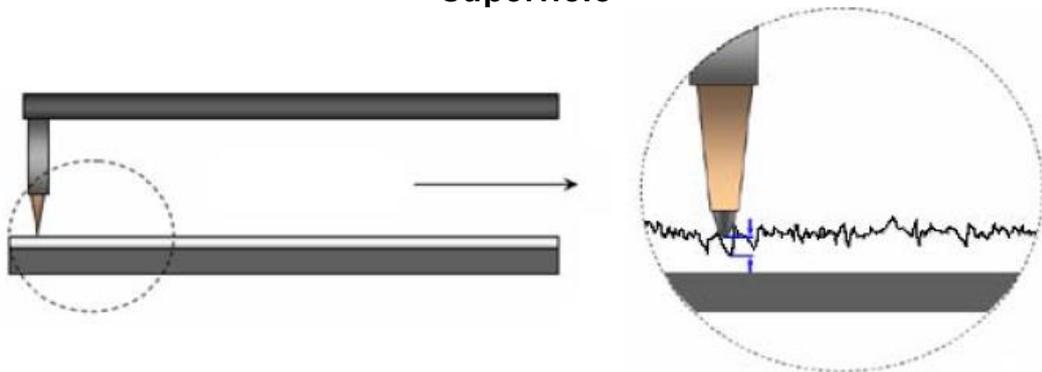
Ainda segundo Klann (2000), na estampagem a alta velocidade pode gerar uma quantidade muito grande de calor localizada. Um efetivo conjunto EP, qualquer que seja mecânico ou químico, é requerido não somente para conformar a peça sem romper, mas também para prevenir “galling” e desgaste da ferramenta.

3.15 Rugosidade

De acordo com Oliveira (2010), todo processo de dar forma como: conformação, usinagem, retífica ou polimento, solidificação e deposição de filme

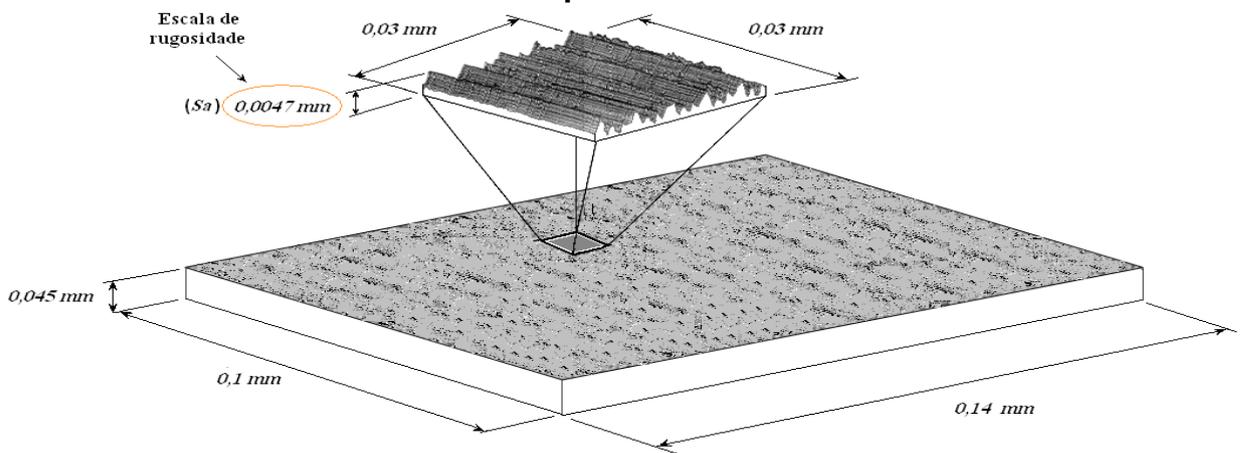
superficiais, solidificação de líquido, leva ao surgimento de superfícies irregulares, que pode ser definido como sendo a rugosidade superficial. Essa rugosidade superficial só pode ser observada quando é ampliada a imagem várias vezes em relação ao seu tamanho original. As Figuras 20 e 21 representam esquematicamente esta proporção.

Figura 20 - Vista bidimensional ampliada de um perfil em uma superfície



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2010)

Figura 21 - Vista tridimensional ampliada de uma área em uma superfície



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2010)

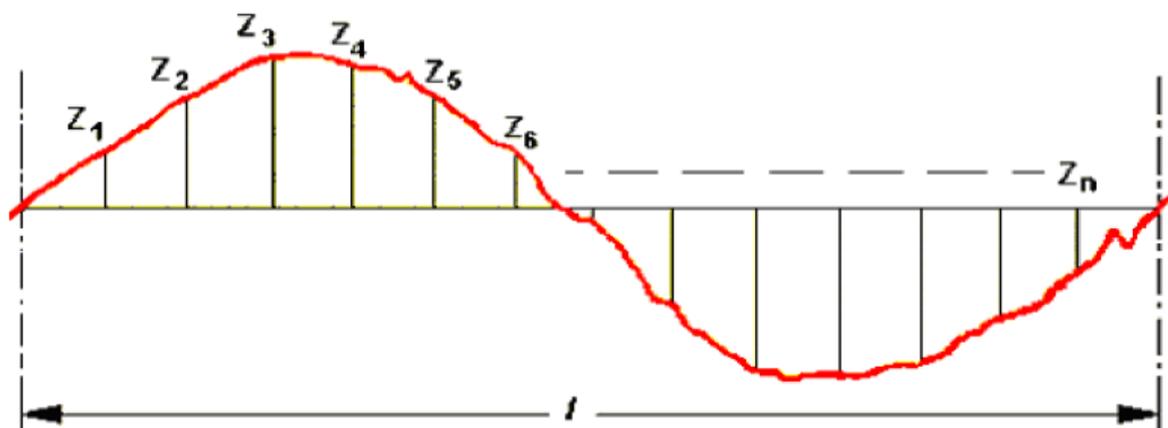
Alguns parâmetros são utilizados como forma de mensurar a dimensão dessas irregularidades como Ra, Rq, e Rku.

3.15.1 Média aritmética dos desvios da superfície (Ra)

Conforme Oliveira (2004) o parâmetro Ra (média aritmética dos desvios da superfície) é o mais utilizado em engenharia. Ele é calculado a partir da média

aritmética dos desvios do perfil, tomando como referência a linha média e é definido pelo comprimento l de amostragem como mostra na Figura 22.

Figura 22 - Rugosidade média Ra



Fonte: Adaptado de Oliveira (2010)

A Equação 5 que define a rugosidade média é dada por:

$$Ra = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + \dots + z_n}{n} \rightarrow Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (5)$$

Na indústria há ampla utilização deste parâmetro para o acompanhamento de processos de fabricação. Caso ocorra alguma variação de Ra é possível indicar se o processo mudou em alguma variável como (força, espessura, lubrificação, etc). Contudo este parâmetro é de natureza média e não sensível a mudanças sutis. Dependendo da aplicação o ideal é ser utilizado com outro parâmetro.

3.15.2 Raiz quadrada das médias dos quadrados (Rq)

De acordo com Oliveira (2004) o parâmetro Rq é considerado como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil R em relação a linha média em um comprimento l de avaliação. A equação que define a rugosidade quadrática média é apresentada pela Equação 6:

$$Rq = \sqrt{\frac{Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + \dots + Z_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (6)$$

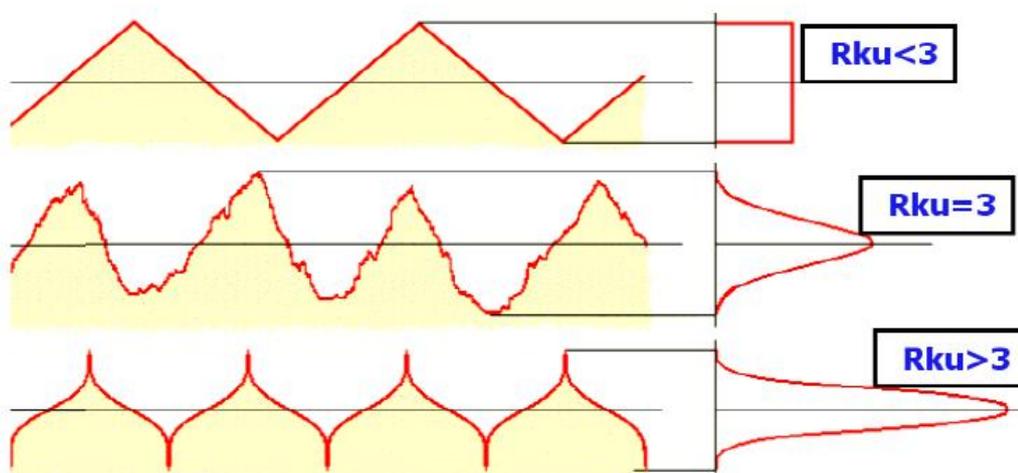
A maior aplicação de Rq ocorre na indústria de fabricação ótica e eletrônica devido à capacidade para descobrir picos espúrios e vales, pois podem comprometer a imagem.

3.15.3 Distribuição e forma dos picos na superfície (Rku)

Segundo Oliveira (2004) este parâmetro é associado à distribuição de picos ao longo do perfil. Uma hipótese é que os picos estejam igualmente distribuídos e sua agudez tem característica aleatória, o Rku terá um valor de referência igual 3. Outra possibilidade é que o Rku seja menor que 3 isto significa que a superfície apresenta picos irregulares e mais achatados $Rku < 3$.

Caso o Rku seja maior que 3 provavelmente a superfície apresenta picos agudos e com pouco mais achatamento, como é possível observar na Figura 23. Este parâmetro é utilizado para verificar o desgaste de uma ferramenta ao longo do processo. Para ter maior confiabilidade este parâmetro deve ser associado com outro para análise mais criteriosa.

Figura 23 - Variações do parâmetro Rku



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2004).

3.16 Teste ANOVA de Fator Único para Diferença Entre Mais de duas Médias Aritméticas

Segundo Mann (2006), ANOVA representa um procedimento utilizado para testar a hipótese nula de que as médias aritméticas de três ou mais populações são iguais. Ao utilizar um teste ANOVA de fator único, estuda-se somente um único fator ou variável.

De acordo com Levine (2012) embora ANOVA seja acrônimo para análise de variância, o termo pode induzir a equívoco, uma vez que o objetivo é analisar a diferença entre médias aritméticas dos grupos, e não as variâncias dos grupos, contudo, ao analisar a variação entre os grupos e dentro grupos, você pode chegar a conclusões sobre possíveis diferenças entre média aritméticas dos grupos. Em ANOVA, a variação total é subdividida entre variações que são atribuídas a diferença entre os grupos e variações que são atribuídas a variações dentro dos grupos.

A aplicação do teste deve a premissa como sendo verdadeira:

- a) A população a partir dos quais as amostras são extraídas são distribuídas de maneira aproximadamente normal;
- b) A população a partir dos quais as amostras são extraídas possuem a mesma variância, correspondente às distribuições das populações: a variância entre amostras e variância dentro as amostras;
- c) As amostras extraídas a partir de diferentes populações são aleatórias e independentes.

A variância entre amostras MQE, fornece uma estimativa com base na variação entre médias aritméticas de amostras extraídas a partir de diferentes populações.

A variação dentro as amostras MQD, fornece uma estimativa baseado na variação dentro dos dados para diferentes amostras, conforme a Equação 7:

$$F_{crit} = \frac{MQE}{MQD} \quad (7)$$

F_{crit} = Valor estatístico .

MQE = Variância entre amostras

MQD = Variância dentro das amostras

Para encontrar os valores de MQE e MQD, deve-se primeiramente calcular fator SQE(soma dos quadrados entre os grupos), e SQD(soma dos quadrados dentro dos grupos) que estão na Equação 8 e 9:

$$SQE = \left(\frac{T_1^2}{n_1} + \frac{T_2^2}{n_2} + \frac{T_3^2}{n_3} + \dots \right) - \frac{(\sum x)^2}{n} \quad (8)$$

$$SQD = \sum X^2 - \left(\frac{T_1^2}{n_1} + \frac{T_2^2}{n_2} + \frac{T_3^2}{n_3} + \dots \right) \quad (9)$$

T_i = a soma dos valores na amostra i

n_i = o tamanho da amostra i

n = o número de valores em todas as amostras = $n_1 + n_2 + n_3 + \dots$

$\sum x$ = a soma dos valores em todas as amostras = $T_1 + T_2 + T_3 + \dots$

$\sum x^2$ = a soma dos quadrados dos valores em todas as amostras

Após o cálculo dos fatores SQE e SQD deve se utilizar na Equação 10 e 11 para chegar finalmente no MQE e MQD.

$$MQE = \frac{SQE}{k - 1} \quad (10)$$

$$MQD = \frac{SQD}{n - k} \quad (11)$$

k = o número de diferentes amostras (ou tratamentos)

n = o número de valores em todas as amostras = $n_1 + n_2 + n_3 + \dots$

SQE = soma dos quadrados entre os grupos

SQD = soma dos quadrados dentro dos grupos

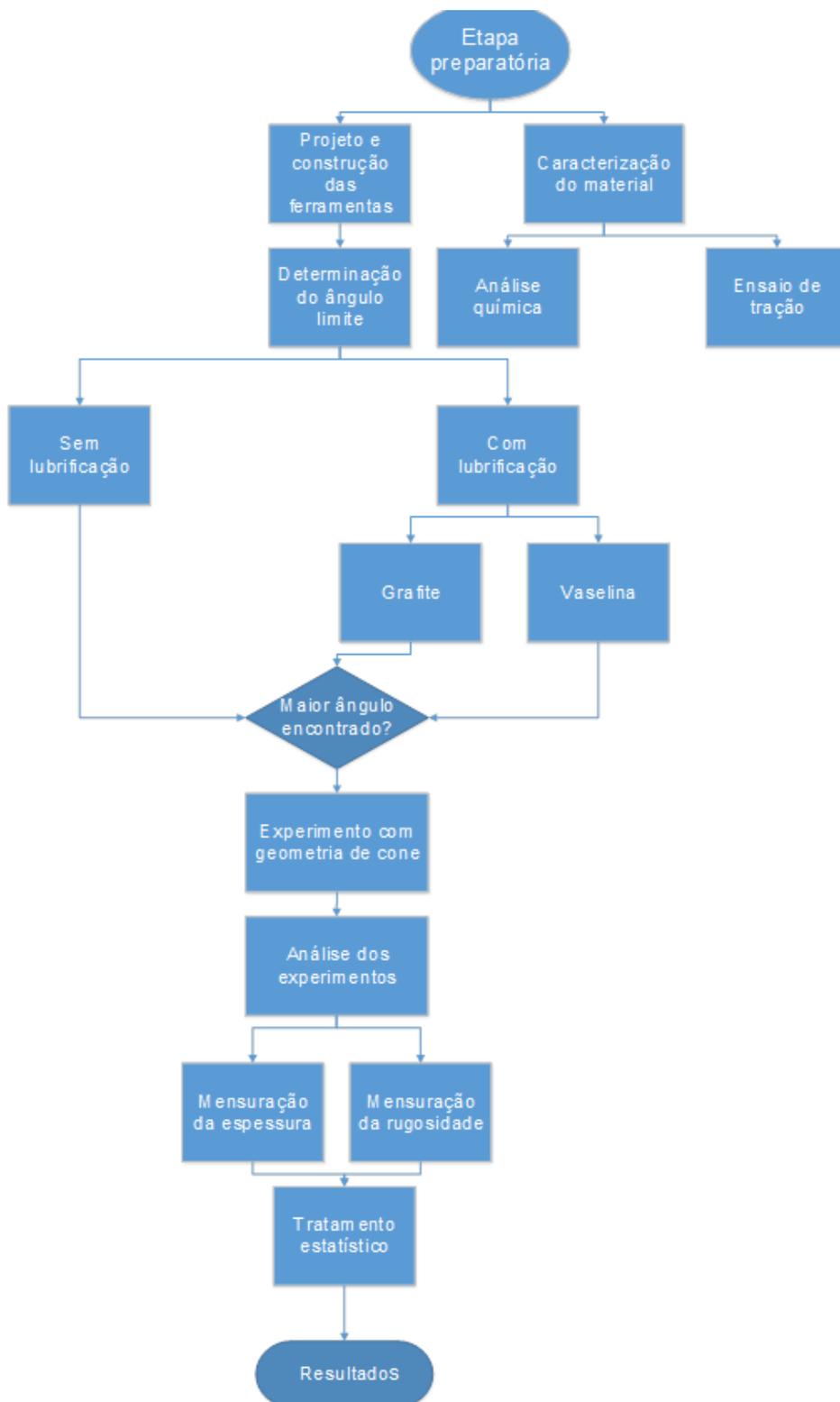
Logo após calculado o fator crítico F_{crit} deve-se utilizar uma tabela F estatística com os seguintes parâmetros de entrada: o grau de liberdade, número de amostras e grau de significância. Existem duas possibilidades para o resultado encontrado:

- a) Se F for menor que o F_{crit} a hipótese é nula e concluímos que as médias aritméticas correspondentes às populações são iguais;
- b) Caso o F seja maior que o F_{crit} significa que estatisticamente seu resultado indica ser diferencial, mas por apenas este teste não é possível afirmar quais.

4 METODOLOGIA

Para avaliar a influência das duas ferramentas de contato, sendo uma com ponta rígida e outra com ponta rotativa, na estampagem incremental da liga de alumínio 1100, procurou-se conjugar atividades de modo a otimizar tempo e recursos disponíveis. Estas atividades e suas interações são descritas a seguir e podem ser visualizada no fluxograma da Figura 24.

Figura 24 - Fluxograma do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Etapa preparatória

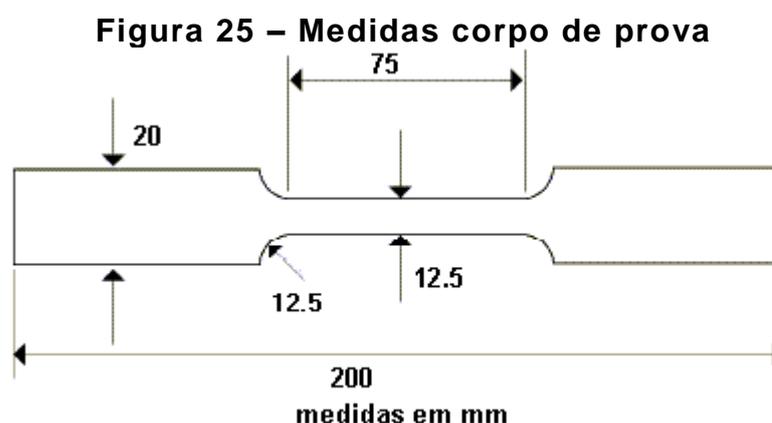
Nesta etapa obteve-se informações necessárias para realização dos experimentos preliminares (caracterização da liga de alumínio, projeto e construção das duas ferramentas de contato).

4.1.1 Análise química

A partir do material inicial (liga de alumínio, com dimensão de (1x500x1000)mm foi cortado uma amostra (1x50x50)mm e foi feita a determinação da composição química por espectrometria de absorção atômica no laboratório de materiais da Fiat Chrysler Automobiles na cidade de Betim.

4.1.2 Ensaio de tração

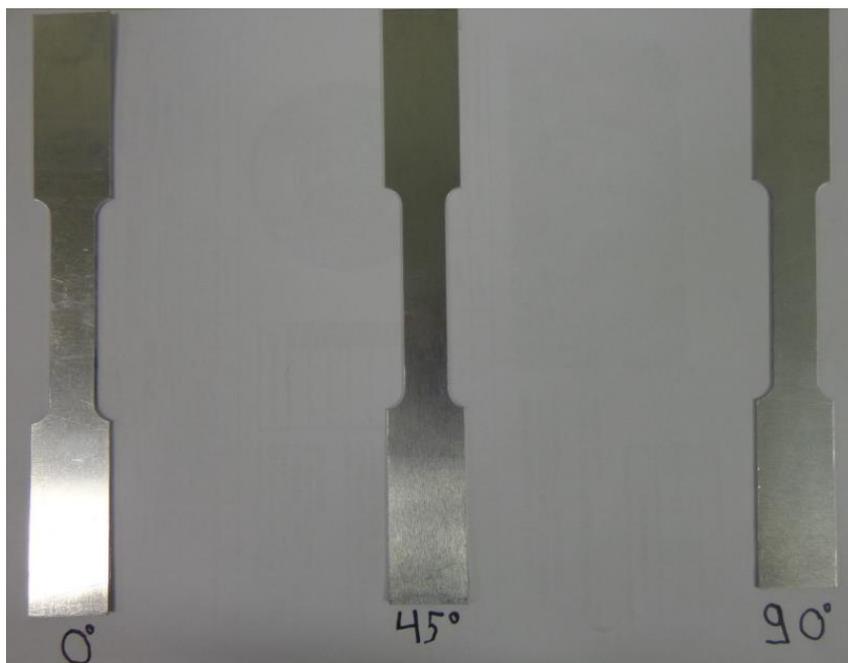
Para o ensaio de tração da liga foram confeccionados corpos de prova de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013. A Figura 25 apresenta as dimensões do corpo de prova.



Fonte: Norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013

A partir de um blank com dimensões (1x500x500)mm foram retiradas três amostras a 0°, 45° e 90° no sentido da direção de laminação, a fim de se confeccionar os corpos de prova e realizar o ensaio de tração para verificar o comportamento do material quanto a sua anisotropia. A Figura 26 mostra um dos conjuntos de 3 corpos de prova confeccionados.

Figura 26 – Corpo de prova a 0°,45, e 90°



Fonte: Elaborado pelo autor

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina modelo Instron 4467 no laboratório de materiais da Fiat Chrysler Automobiles. O equipamento, Figura 27, tem uma capacidade máxima tração e compressão de 30 KN, faixa de velocidade de 0,01 a 500 mm/min e monitoramento com software Bluehill 2.

Figura 27 – Máquina de ensaio de tração Instron 4467

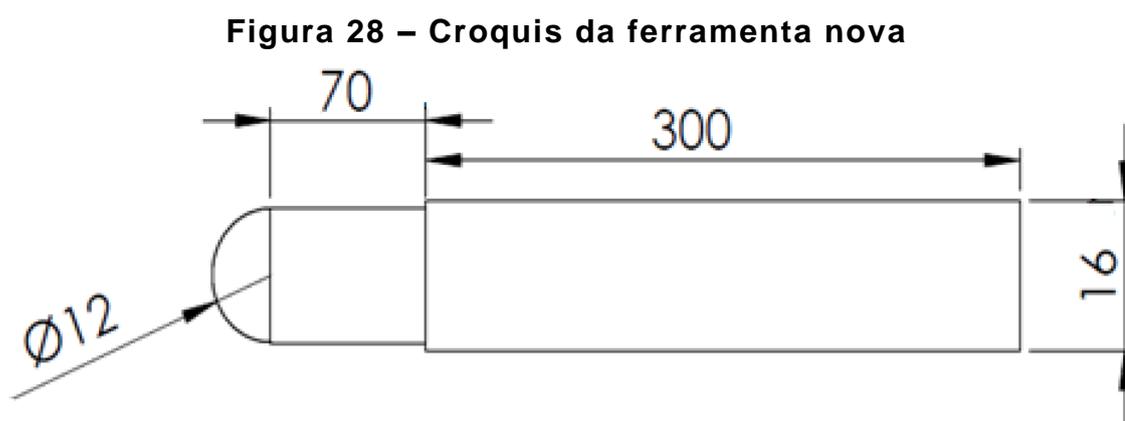


Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.3 Projeto e construção das ferramentas de contato

No projeto inicial foi feita uma análise dos principais processos de fabricação para confecção da ferramenta. Foi determinado o processo de usinagem convencional devido a geometria da ferramenta, e disponibilidade de recurso.

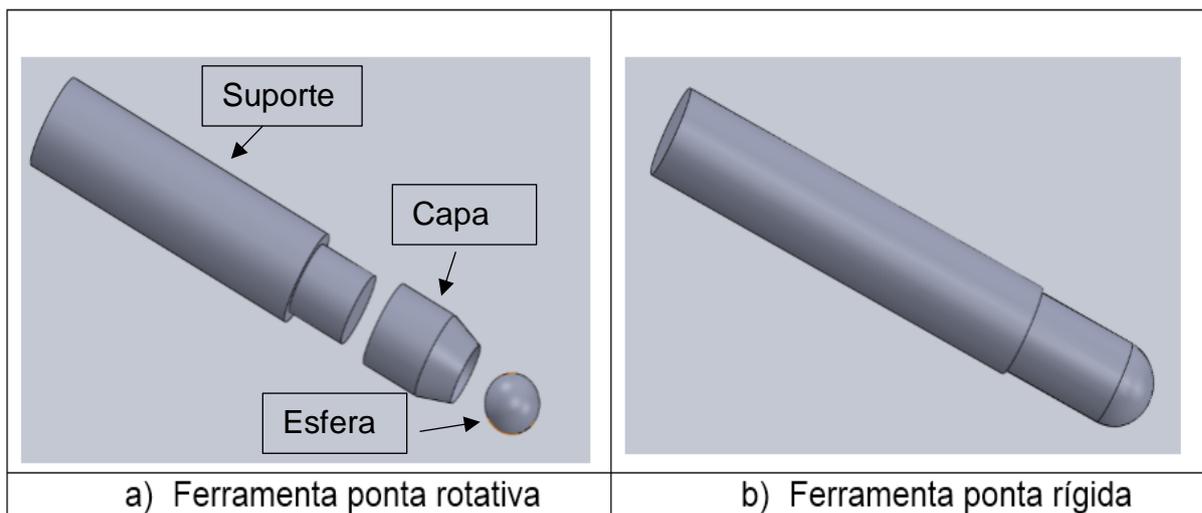
O início da construção das ferramentas foi realizado a partir de croquis. A Figura 28 ilustra a primeira ideia utilizada para a fabricação da ferramenta rígida. A matemática dessa geometria inicial foi gerada no programa Solidworks e posteriormente convertido para linguagem de máquina para usinagem em torno CN C. No teste inicial percebeu serem necessários modificações no comprimento inicial estabelecido, ou seja 376mm, Figura 28. O comprimento de 76 mm ficou curto vindo a colidir com o prensa chapa. Após testes o comprimento foi alterado de 76mm para 126mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a definição da ferramenta rotativa foi avaliado primeiramente o modo de fixação da ponta rotativa (esfera), na capa, bem como a região de contato com a haste fixa. Após várias análises, chegou-se ao projeto final da ferramenta rotativa. Onde passou a ser composta por 3 partes distintas, que após unidas formam a ferramenta, sendo elas a haste fixação no porta pinça, capa rosqueável, e esfera de rolamento. A Figura 29 a) e b) ilustra a forma final da geometria da ferramenta rotativa e rígida respectivamente.

Figura 29 – Croquis das ferramentas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a confecção das ferramentas foram realizados os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento na ferramenta rígida, e na rotativa nos seguintes componentes, haste de fixação e capa rosqueável. Tais procedimentos foram feitos no laboratório de materiais de construção mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais Campus Contagem.

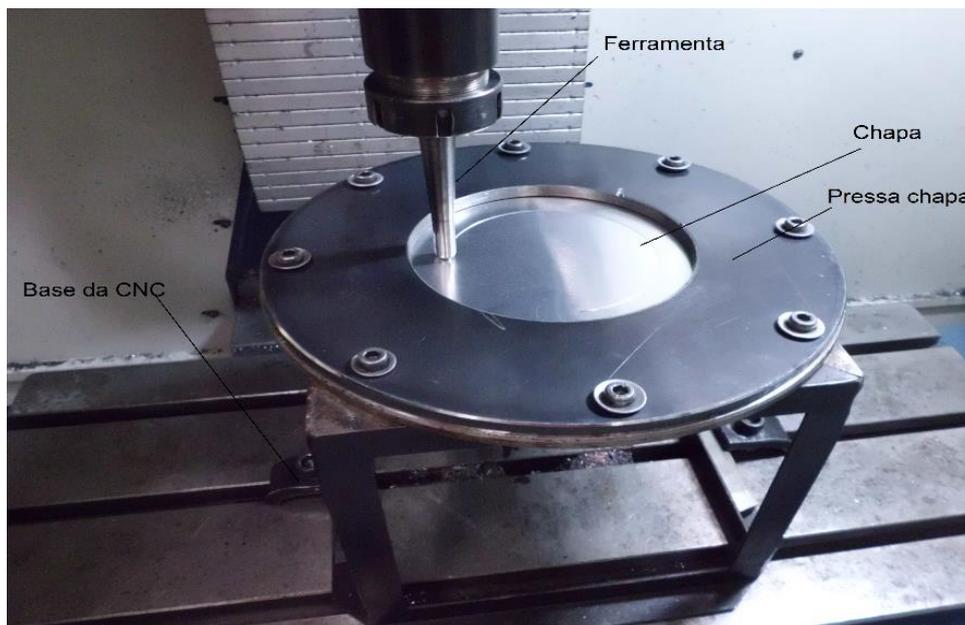
4.2 Determinação do ângulo limite ou parede máxima

Para a determinação do ângulo limite ou parede máxima com passe único foi utilizado a geometria de tronco de cone conforme trabalho de Lopes (2013).

O software Solidworks foi utilizado na construção da matemática da curva para determinação do ângulo limite. Em seguida, o programa gerado foi convertido de linguagem CAD para CAM e executado no centro de usinagem.

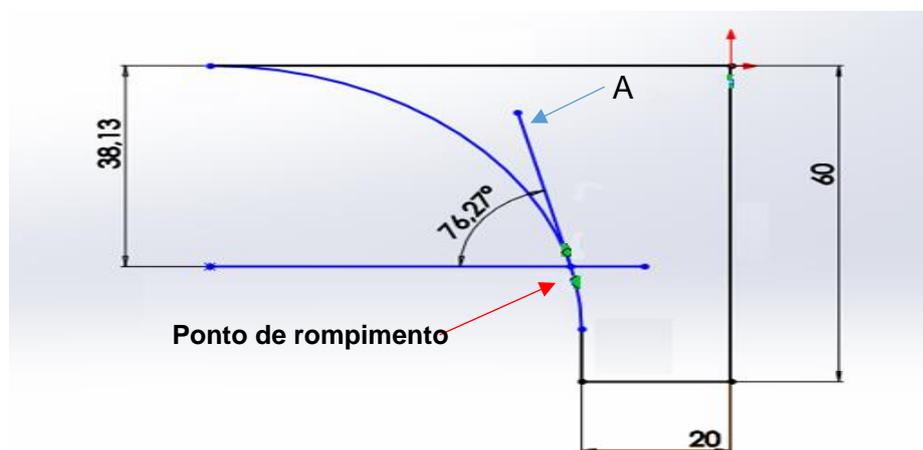
A velocidade do ensaio no centro de usinagem foi de 1500 mm/minutos com incremento vertical de 0,1mm conforme Lopes (2013). Três situações de lubrificação foram avaliadas. A primeira sem lubrificação, a segunda vaselina e a terceira com grafite em pó.

A Figura 30 ilustra a chapa colocada no dispositivo fixado na base do centro de usinagem CNC. A chapa é fixada no dispositivo por intermédio de um prensa chapa composto de 08 parafusos Allen. A Figura 30 também ilustra uma ferramenta de ponta rígida fixada no cabeçote principal da máquina.

Figura 30 – Suporte prensa chapa

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a confecção da peça na geometria de tronco de cone, foi utilizado o equipamento da marca Mitutoyo modelo QM-messure 353 pertencente ao laboratório de metrologia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Campus Contagem, para mensurar a altura do ponto de rompimento. Em seguida é realimentado o programa que deu origem a peça para se criar um plano simétrico, indicado pela letra A na Figura 31, posteriormente é medido o ângulo formado entre a reta horizontal e o plano simétrico. A Figura 31 ilustra um exemplo do ângulo máximo para uma altura de rompimento de 38,13 mm como caráter ilustrativo.

Figura 31 - Ângulo de parede máximo

Fonte: Elaborado pelo autor

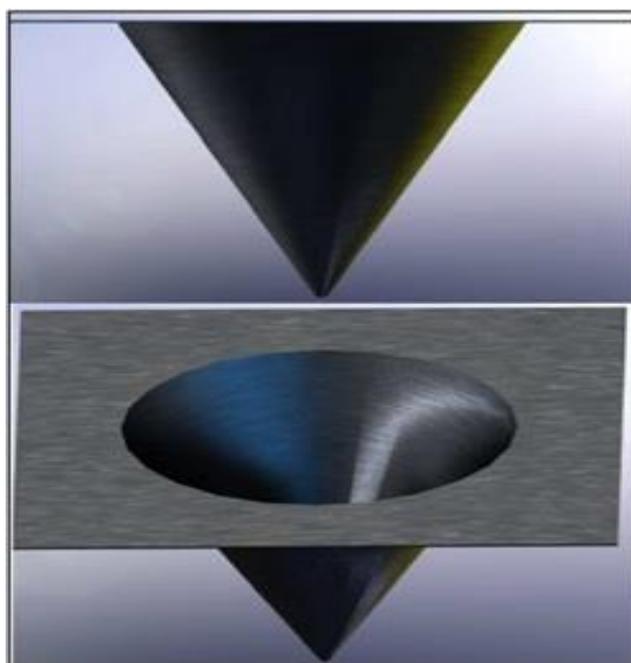
4.3 Experimento com geometria de cone reto

Após a determinação do ângulo limite nas diversas condições citadas anteriormente, foi realizada a estampagem incremental de um cone reto com melhor resultado encontrado quanto a ferramenta e lubrificação.

Para a estampagem da geometria no formato de cone reto foi utilizada uma peça quadrangular (200x200 mm) com a mesma espessura (1mm) e mesma liga. Foram realizados a estampagem em três cones retos em ângulo anterior ao qual ocorreu o rompimento no ângulo limite. A trajetória de avanço da ferramenta foi a unidirecional de incremento, trata-se de uma técnica incremental a qual a ponta da ferramenta movimenta-se no contorno da peça. Sendo que deixa marcas no ponto de transição, conhecida como linha de incremento.

A Figura 32 ilustra a forma do cone reto a ser obtido após a estampagem incremental.

Figura 32 - Geometria de estampagem



Fonte: Adaptado de Patrício (2011)

4.4 Análise dos experimentos

Na análise dos experimentos foram realizados as medições da espessura do cone reto ao longo do comprimento de sua geratriz, rugosidade superficial e tratamentos dos dados.

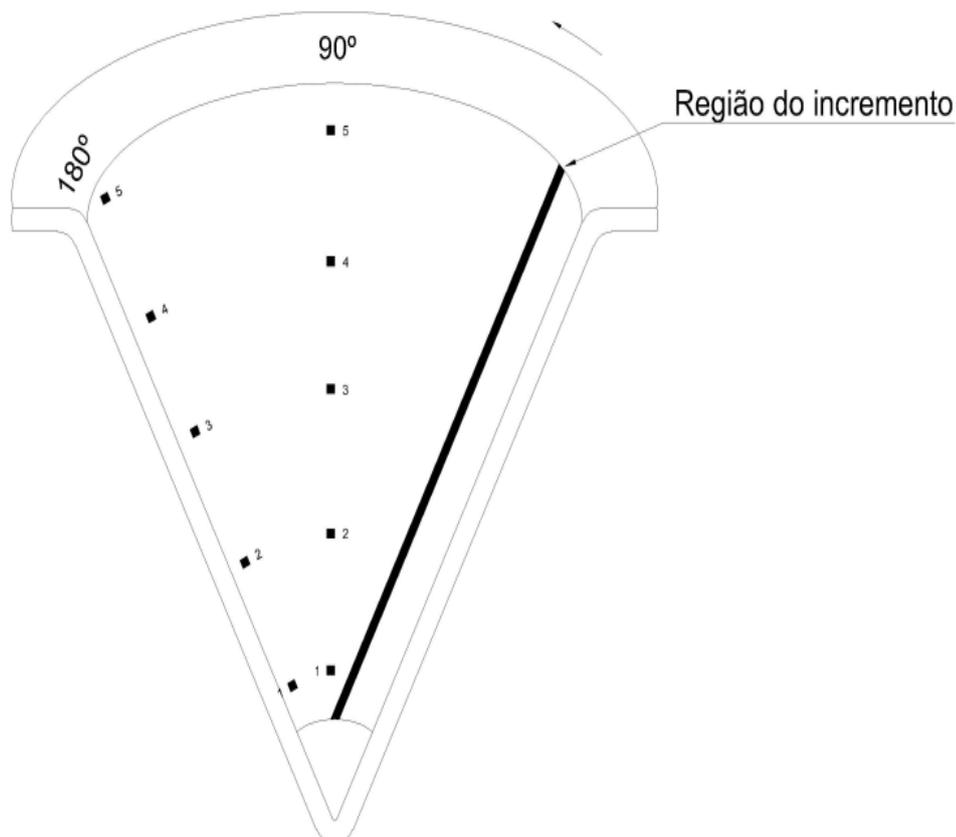
4.4.1. Mensuração da espessura

Para mensurar a espessura dos cones foi utilizado um relógio comparador e um equipamento CNC, pertencente ao laboratório de metrologia da PUC-Minas, campus Coração Eucarístico. As medidas foram realizadas a 0° , 90° , 180° em relação a linha de incremento. Em cada ângulo ao longo da geratriz foram realizadas 6 medidas, sendo um total de 18 pontos medidos em cada peça.

4.4.2 Mensuração da Rugosidade

As medições de rugosidade superficial interna das peças no formato de cone reto foram obtidas com uso de um rugosímetro (Taylor Robson) no Laboratório de Metrologia da PUC-Minas campus Coração Eucarístico. Os parâmetros avaliados foram as rugosidades R_a , e R_q . Para se obter uma maior repetibilidade nas medições foi adotado o seguinte procedimento:

- a) Calibração do instrumento de medição e limpeza das peças com álcool isopropílico;
- b) Localização da linha de incremento e posicionamento do tronco de cone sobre a morsa, seguido de uma rotação de noventa graus no sentido anti-horário em relação a linha de incremento;
- c) Verificação do alcance máximo do braço do rugosímetro ao longo do comprimento do cone, após esta etapa, o comprimento de extensão interna do cone foi dividido em 5 partes iguais conforme ilustra a Figura 33. Foram feitas 3 medições em cada parte, igualmente dividida (0° , 90° , 180°) em relação a linha de incremento, perfazendo um total de 15 medições internas em cada peça.

Figura 33 – Pontos de medição

Fonte: Adaptado de Horta (2015)

4.5 Tratamento estatístico

Com o objetivo de verificar a diferenciação entre as amostras, após a coleta de dados referente a rugosidade superficial e a espessura do material, foi utilizada ferramenta estatística conhecida como análise da variância com um fator (ANOVA). A técnica é um teste de hipótese usada para comparar médias de três ou mais populações utilizadas por vários pesquisadores da área.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção é apresentado os resultados obtidos ao longo do trabalho. A ordem cronológica de apresentação é: Análise química; Ensaio de tração; Determinação ângulo limite; Experimento com geometria de cone reto; Mensuração da espessura do cone reto; Mensuração da rugosidade do cone reto; Tratamento estatístico.

5.1 Análise química

A Tabela 5 apresenta a composição química do material em estudo, obtida por análise de espectrometria de absorção atômica. Os valores encontrados foram comparados com a norma europeia EN 573-3. A composição química que se aproximou foi a liga de alumínio EN AW-1100. A Tabela 6 apresenta parte norma EN 573-3 utilizada.

Tabela 5 – Resultado análise química

Material: Liga de Alumínio 1100								
Resultados Análise Química								
Equipamento: Spectro Maxx - EIME: 012283055								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
1	0,192	0,509	0,007	0,006	0,004	<0,000	0,002	0,006
2	0,194	0,504	0,007	0,006	0,005	<0,000	0,003	0,007
3	0,195	0,504	0,007	0,006	0,006	<0,000	0,002	0,006
Média	0,194	0,506	<0,007	0,006	0,005	<0,000	0,002	0,006
SD	0,001	0,003	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
Lim. Min. interno	..	..	0,05	..	..	..	..	..
Lim. Max. interno	0,950	..	0,200	0,050	..	..	..	0,100
	Ti	Ag	B	Ba	Be	Bi	Ca	Cd
1	0,013	<0,000	0,001	<0,000	0,001	<0,001	0,002	<0,000
2	0,013	<0,000	0,001	<0,000	0,001	<0,001	0,003	<0,000
3	0,013	<0,000	0,001	<0,000	0,001	<0,001	0,004	<0,000
Média	0,013	<0,000	0,001	<0,000	0,001	<0,001	0,003	<0,000
SD	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
	Co	Ga	Hg	In	Li	Na	P	Pb
1	<0,001	0,005	<0,002	<0,000	0,038	0,000	<0,001	0,003
2	<0,001	0,005	<0,002	<0,000	0,031	0,000	<0,001	0,003
3	<0,001	0,005	<0,002	<0,000	0,034	0,000	<0,001	0,002
Média	<0,001	0,005	<0,002	<0,000	0,035	0,000	<0,001	0,003
SD	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
Lim. Min. interno	..	..	..	..	..	..	..	..
Lim. Max. interno	..	..	..	..	..	..	..	..
	Sb	Sn	Sr	V	Zr	Al	La	Ce
1	<0,003	0,018	<0,000	0,008	0,002	99,170	<0,000300	<0,001500
2	<0,003	0,019	<0,000	0,008	0,001	99,180	<0,000300	<0,001500
3	<0,003	0,019	<0,000	0,008	0,002	99,180	<0,000300	<0,001500
Média	<0,003	0,019	<0,000	0,008	0,002	99,180	<0,000300	<0,001500
SD	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,00000	0,00000
Lim. Min. interno	..	..	..	..	..	..	..	..
Lim. Max. interno	..	..	..	..	..	..	..	..
Nota: % Cobre (Recontrolado)								
Solicitado: 0,05 - 0,20								
Encontrado: 0,011								

Fonte: Fiat Automóveis

Tabela 6 – Liga de alumínio

Especificação:

Table 1 – Aluminium – 1 000 series

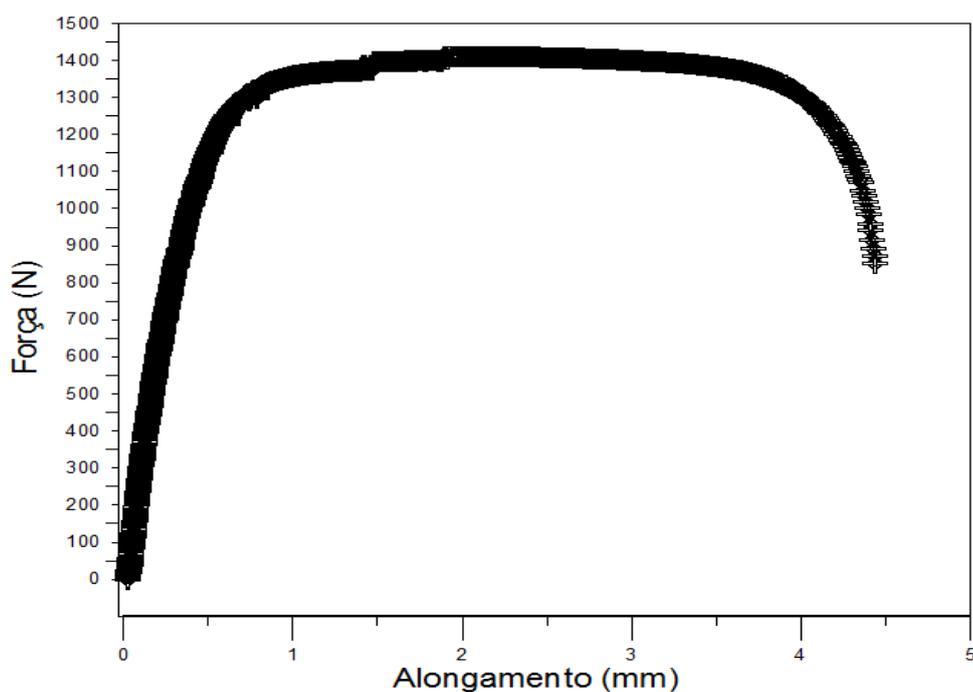
Alloy designation		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Remarks	Others ^a		Aluminium min.
Numerical	Chemical symbols													Each	Total ^b	
EN AW-1100	EN AW-Al99,0Cu	0,95 Si + Fe		0,05-0,20	0,05	-	-	-	0,10	-	-	-	e	0,05	0,15	99,00 ^c

Fonte: Norma Europeia EN 573-3

5.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado em três corpos de prova nas direções (0°, 45°, e 90°) em relação a direção de laminação em uma máquina modelo Instron 4467 no laboratório de materiais da Fiat Chrysler Automobiles. A Figura 34 apresenta o comportamento da Força (N) versus Alongamento (mm) na direção 0°,

Figura 34 – Força (N) X Deformação (mm) - CP0°



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados encontrados no ensaio de tração 0°, 45°, e 90° em relação a direção de laminação são mostrados nas Tabelas 7, 8, e 9 respectivamente. Onde pode se verificar características importantes do material, como limite de escoamento, limite de ruptura, alongamento e módulo de elasticidade.

Tabela 7- Principais características mecânica liga da Alumínio 1100 a 0° do sentido da laminação

	Espessura (mm)	σ_{esc} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	1,00	129,76	141,17	8,22	43,07
Desvio padrão	0,00	0,44	0,95	0,35	3,23

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8- Principais características mecânica liga da Alumínio 1100 a 45° do sentido da laminação

	Espessura (mm)	σ_{esc} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	1,00	137,03	148,05	5,52	50,96
Desvio padrão	0,00	0,77	0,6	0,29	4,18

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 9- Principais características mecânica liga da Alumínio 1100 a 90° do sentido da laminação

	Espessura (mm)	σ_{esc} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
Média	1,00	143,03	154,44	4,96	46,08
Desvio padrão	0,01	1,89	2,24	0,69	4,65

Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se pelos valores obtidos que o material apresentou maior alongamento e menor limite de escoamento no sentido de laminação. Acredita-se que o material tenha apresentado esse comportamento, devido ao alinhamento dos grãos.

O índice de anisotropia (R) foi obtido pela Equação 11 de acordo com Patrício (2011):

$$R = \ln\left(\frac{W_f/W_0}{t_f/t_0}\right) \quad (11)$$

Onde:

W_f = Largura final do corpo de prova;

W_0 = Largura inicial do corpo de prova;

t_f = Espessura final do corpo de prova;

t_0 = Espessura inicial do corpo de prova.

A anisotropia normal média \bar{R} foi obtida pela Equação 12:

$$\bar{R} = \frac{R_{0^\circ} + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4} \quad (12)$$

Os Resultados da anisotropia R e anisotropia normal média \bar{R} , são apresentados na Tabela 10:

Tabela 10- Anisotropia normal

R_{0°	R_{45°	R_{90°	\bar{R}	ΔR	Anisotropia total (normal e planar)
0,33	0,56	0,96	0,6025	0,085	

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se concluir que o material apresentou maior resistência a deformação na direção a 90°, ou seja, maior dificuldade em deformar na direção da espessura. Pode se afirmar também que o material é anisotrópico pois, os valores obtidos do coeficiente de anisotropia são diferentes nas direções a 0°, 45°, e 90°. Segundo Patrício (2011) quando ' \bar{R} ' é maior que a unidade, é indicativo de que o material é resistente à diminuição da espessura (haverá aumento da força transversal

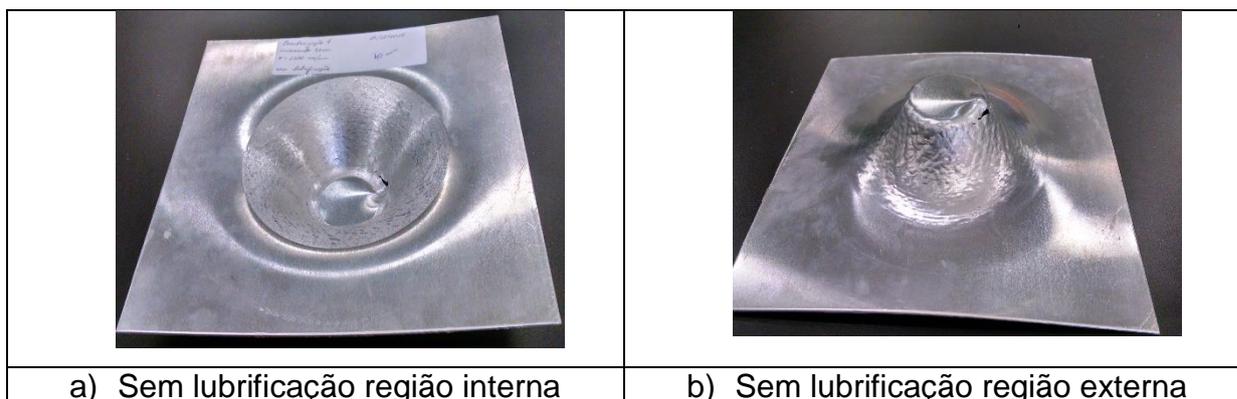
requerida à sua deformação), ou seja, quanto maior o seu valor, pior é sua capacidade de conformação.

5.3 Determinação Ângulo limite

Conforme o fluxograma do trabalho nesta etapa foi determinado o ângulo limite nas condições impostas (a seco, com vaselina, e com grafite em pó) para as ferramentas rígida e rotativa.

A Figura 35(a) e (b) mostra a superfície interna e externa do tronco de cone obtida com uso de ferramenta de ponta rígida sem a utilização de lubrificantes na determinação do ângulo limite. A superfície interna da peça Figura 35 (a) apresentou acabamento superficial rugoso. A Figura 35 (b) mostra a superfície externa que apresentou um defeito parecido com “casca de laranja”.

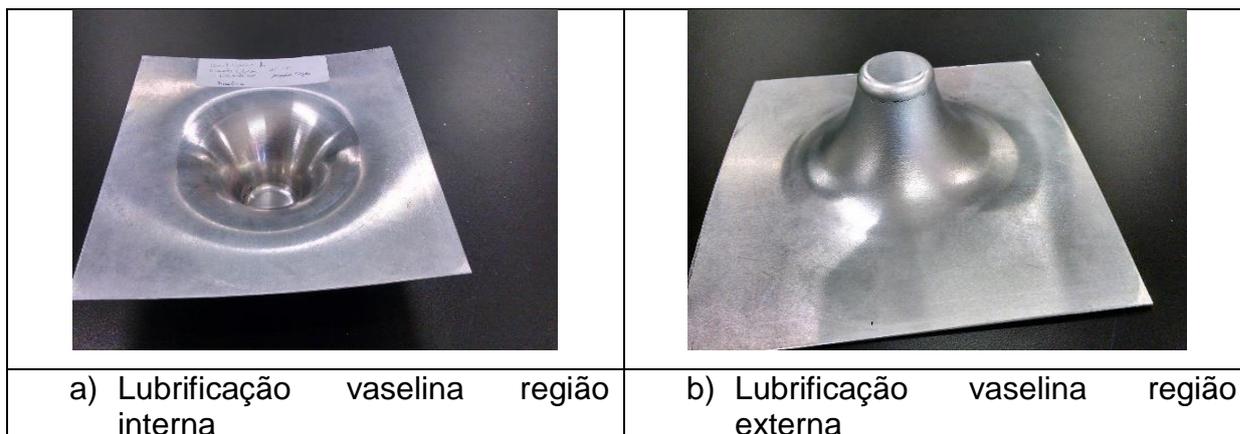
Figura 35 – Tronco de cone ferramenta rígida



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 36 (a) e (b) respectivamente mostra as superfícies interna e externa do tronco de cone estampado com uso de ferramenta de ponta rígida e lubrificante a base de vaselina, apresentaram acabamento superficial espelhado na região interna, já na externa pode se observar que não apareceu o defeito ocorrido com a primeira situação estampada, ou seja, sem uso de lubrificante. Neste caso o uso da vaselina apresentou melhor resultado em relação a estampagem sem lubrificação.

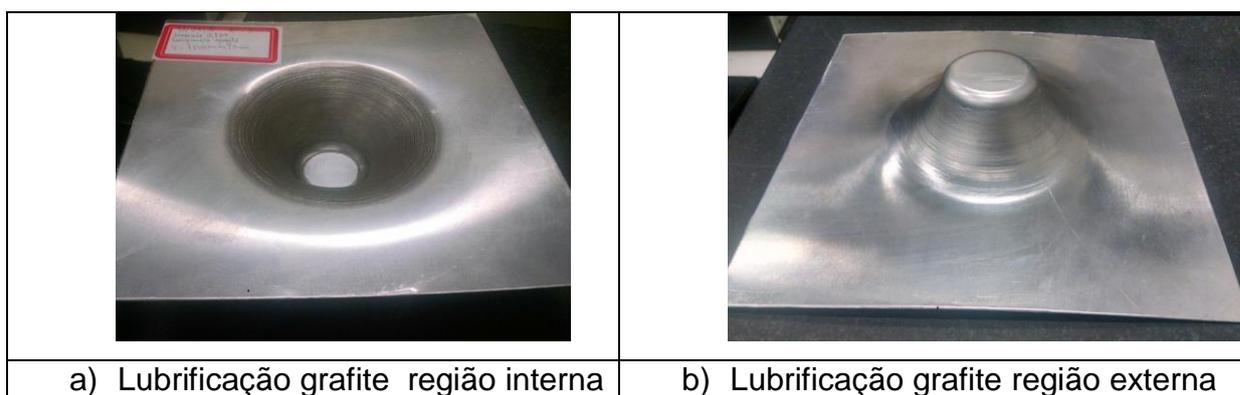
Figura 36 – Tronco de cone ferramenta rígida



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 37 (a) e (b) mostra as superfícies interna e externa do tronco de cone obtido após a estampagem incremental, com uso da ferramenta de ponta rígida e utilização do lubrificante a base de grafite na determinação do ângulo limite. A superfície interna da peça Figura 37 (a) apresentou acabamento superficial fosco com arranhões profundos nas peças estampadas, também percebeu-se que ao realizar a limpeza da peça com álcool isopropílico não houve remoção completa do grafite na superfície, permanecendo fosca após limpeza. A Figura 37 (b) mostra a superfície externa que apresentou acabamento superficial intermediário entre as condições estudadas (sem lubrificação e com vaselina).

Figura 37 – Tronco de cone ferramenta rígida



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 11 mostra os resultados coletados a partir da mensuração da profundidade a qual ocorreu o rompimento nas peças obtidas com ferramenta rígida nas três condições (sem lubrificação, vaselina e com grafite). Foram realizados três experimentos nas mesmas condições e determinado a média e o desvio padrão.

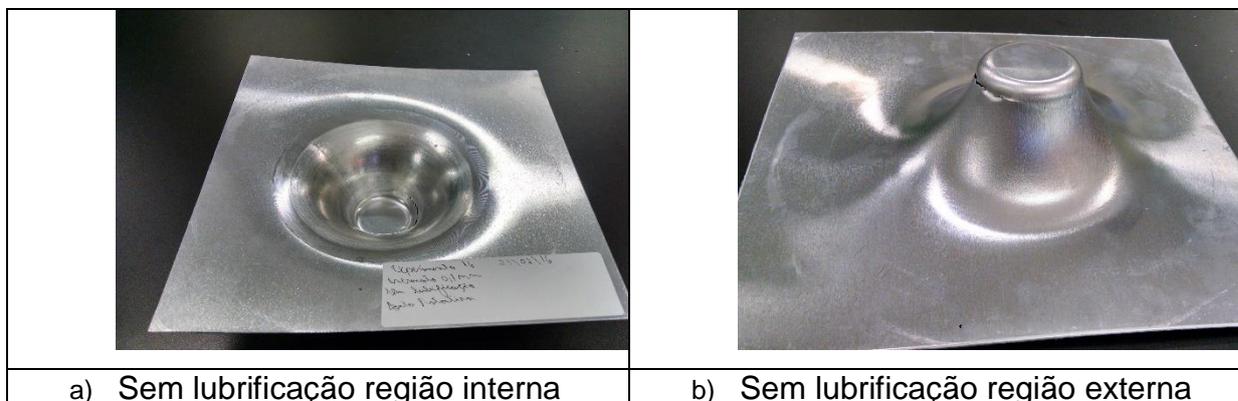
Tabela 11 – Resultados Ferramenta rígida

Experimento	Ângulo Máximo (°)	Desvio padrão (°)
Sem Lubrificante	57,854	1,197
Vaselina	72,987	1,549
Grafite em pó	62,901	2,512

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos mostram que o lubrificante vaselina apresentou melhor desempenho na interfase ferramenta/peça.

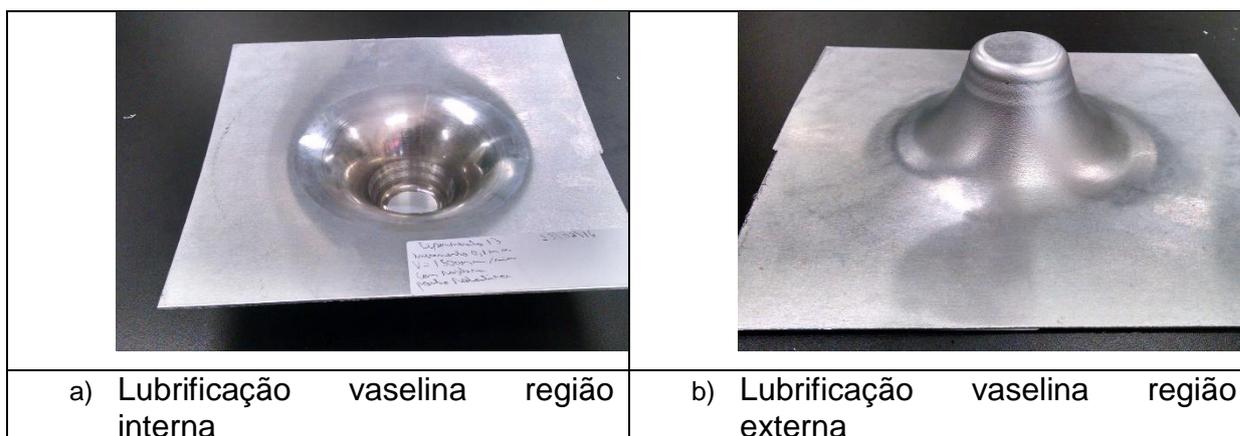
A Figura 38(a) e (b) mostra as superfícies interna e externa do tronco de cone obtido com o uso da ferramenta de ponta rotativa sem a utilização de lubrificantes na determinação do ângulo limite. A superfície interna da peça, Figura 38 (a), apresentou melhor acabamento superficial em relação a peça obtida na mesma condição com ferramenta rígida. A Figura 38 (b) mostra a superfície externa que apresentou melhor acabamento em comparação com utilização de lubrificante a base de grafite em pó obtida com o uso da ferramenta rígida.

Figura 38 – Tronco de cone ferramenta rotativa

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 39 (a) e (b) mostra as superfícies interna e externa do tronco de cone obtido com uso da ferramenta de ponta rotativa e lubrificante a base de vaselina na determinação do ângulo limite. A superfície interna e externa da peça, Figura 39 (a) e (b) apresentou acabamento superficial superior em relação as outras condições impostas obtidas com uso de ferramenta rígida.

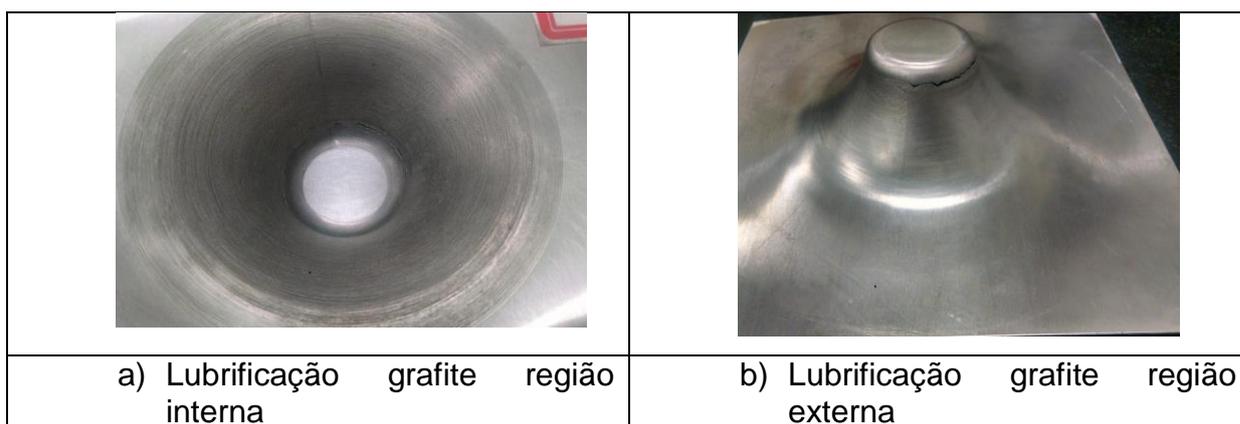
Figura 39 – Tronco de cone ferramenta rotativa



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 40 (a) e (b) mostra as superfícies interna e externa do tronco de cone obtido com a ferramenta de ponta rotativa e utilização do lubrificante a base de grafite na determinação do ângulo limite. A superfície interna da peça Figura 36 (a) apresentou acabamento superficial semelhante a ferramenta rígida com grafite, mas com pequenos arranhões, perceptíveis. A Figura 40 (b) mostra a superfície externa que apresentou acabamento superficial melhor em relação a ferramenta rígida sem lubrificação, porém, após a limpeza com álcool isopropílico observou-se que continuou a ocorrer aderência do lubrificante sobre a superfície da peça.

Figura 40 – Tronco de cone ferramenta rotativa



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 12 mostra os resultados coletados a partir da mensuração da profundidade a qual ocorreu o rompimento nas peças com ferramenta rotativa nas três condições (sem lubrificação, vaselina, e com grafite). Foram realizados três

experimentos nas mesmas condições e determinado a média das medições e o desvio padrão.

Tabela 12 – Resultados Ferramenta rotativa

Experimento	Ângulo Máximo (°)	Desvio padrão (°)
Sem Lubrificante	71,653	1,006
Vaselina	76,434	0,257
Grafite em pó	68,680	2,939

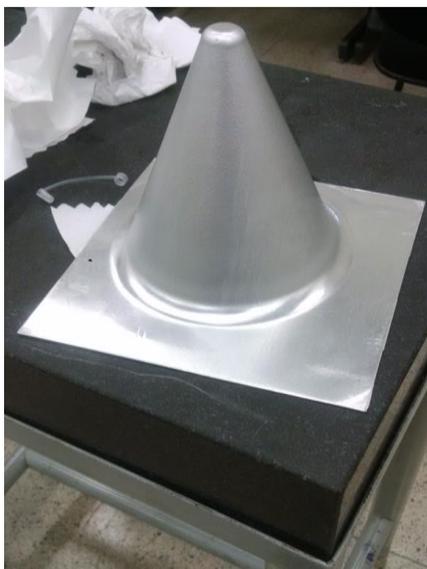
Fonte: Elaborado pelo autor

Com todos os dados obtidos, ferramenta rígida e rotativa, foi possível verificar que o lubrificante vaselina e ferramenta rotativa apresentou maior ângulo limite para o teste com geometria de tronco de cone.

5.4 Experimento com geometria de cone reto

Anteriormente foi observado que a condição de maior ângulo limite foi a com ferramenta rotativa e lubrificação a base de vaselina, o valor encontrado foi de 76,434°. Após esta etapa foram confeccionadas 3 peças em formato de cone reto, com dois graus anteriores ao qual ocorreu o rompimento, ou seja, a 74,434°, o motivo da escolha foi tentar obter um cone reto sem ruptura. A Figura 41 ilustra a peça estampada com uso do lubrificante vaselina e ferramenta rotativa.

Figura 41 – Cone estampado



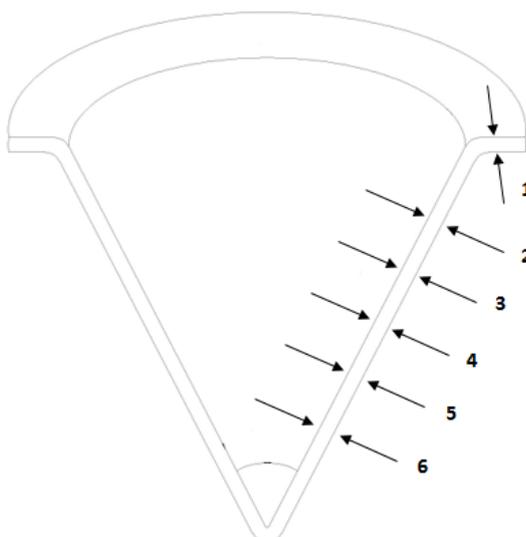
Fonte: Elaborado pelo autor

A estampagem ocorreu de forma normal e foi interrompida devido a limitação do diâmetro da ferramenta. A peça não apresentou ruptura.

5.5 Mensuração da espessura do cone reto

Após a estampagem dos três cones retos, ocorreu a divisão de cada cone em 6 regiões distintas para o mensuramento da espessura ao longo do seu comprimento. A Figura 42 apresenta as regiões com as divisões onde foi realizado a medição da espessura.

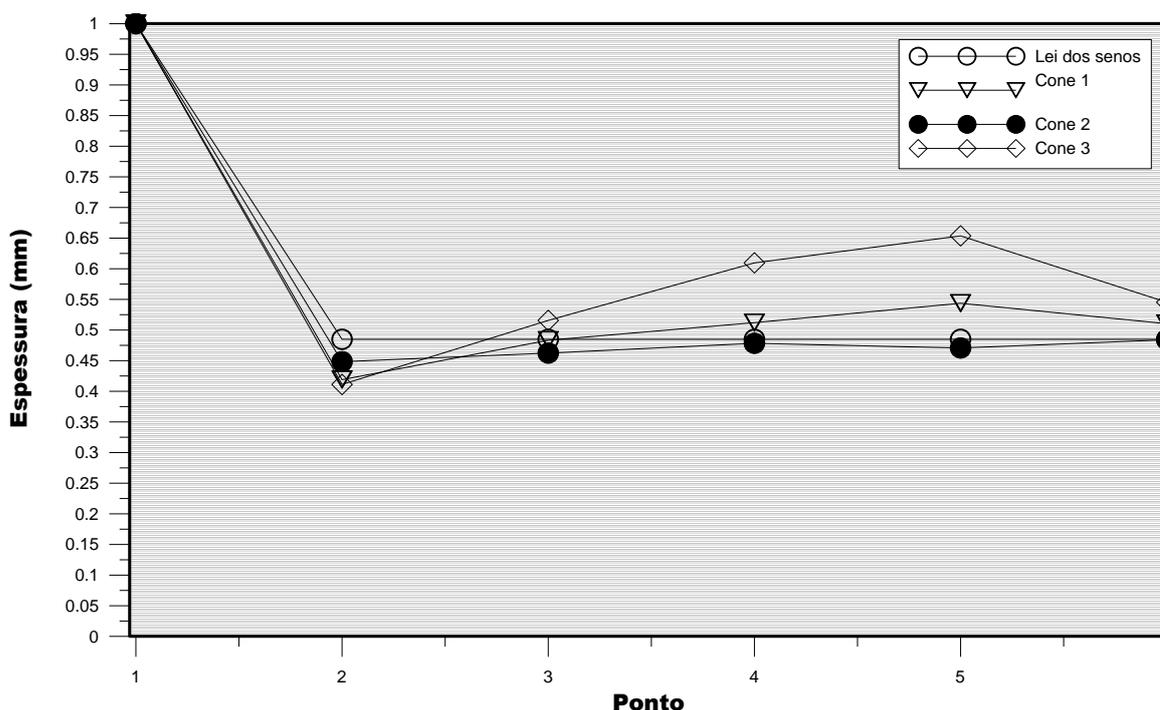
Figura 42– Região medição da espessura



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 43 apresenta o gráfico com resultado da distribuição da espessura ao longo do comprimento do cone reto, onde é possível de se observar que, a distribuição da espessura nas condições imposta na liga de alumínio 1100, não segue exatamente a lei dos senos, conforme outros autores consideram.

Figura 43 – Variação da espessura ao longo do comprimento do cone



Fonte: Elaborado pelo autor

O ponto 1 indica a espessura inicial da peça. No ponto 2 a diferença da espessura entre os três ensaios foi de 0,050mm. A partir do ponto 2 até o ponto 5 ocorreu uma diferença no comportamento da espessura das três peças, percebe-se que o ensaio do cone 1 foi o que ocorreu menor redução na espessura. Do ponto 5 até o ponto 6 (fundo do cone) percebe-se que as espessuras referentes aos 3 ensaios realizados convergiram para aproximadamente o mesmo valor de espessura. Cone 1, 2, e 3, as espessuras foram respectivamente 0,51 mm, 0,48 mm, e 0,55 mm.

5.6 Mensuração da rugosidade do cone

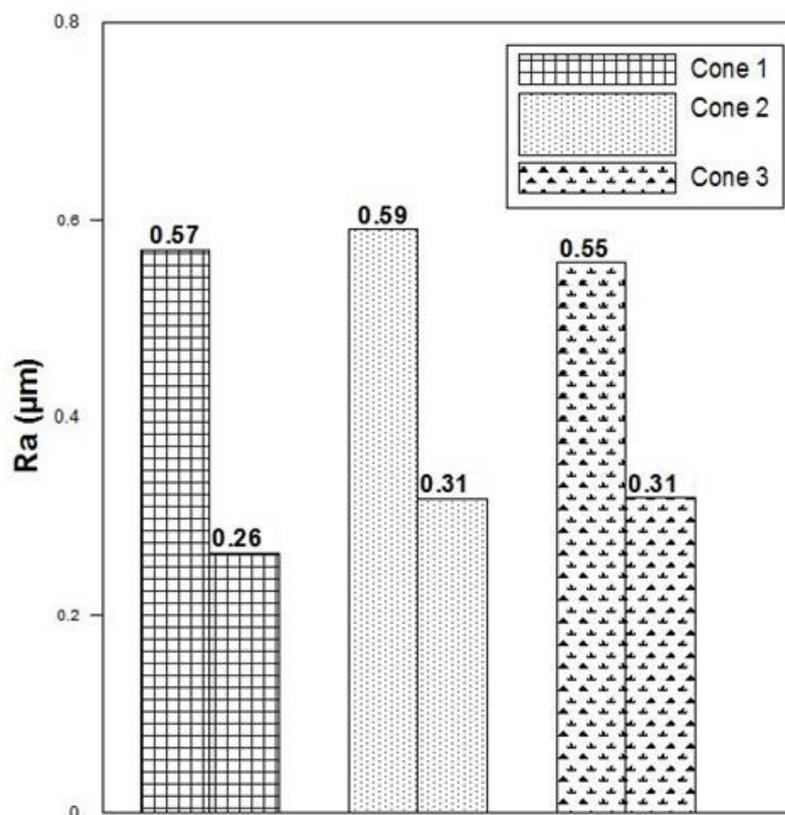
A Tabela 13 apresenta os valores de rugosidade superficial do parâmetro Ra, medido ao longo do cone reto. Em cada cone foram realizadas 15 medidas, sendo realizadas 5 medidas em cada ângulo (0°, 90°, e 180°) em relação a linha de incremento.

Tabela 13 – Média aritmética dos desvios da superfície

		Cone 1	Cone 2	Cone 3
		Ra (μm)	Ra (μm)	Ra (μm)
Região 0°	1	0,435	0,343	0,379
	2	0,411	0,445	0,35
	3	0,39	0,438	0,415
	4	0,57	0,491	0,319
	5	0,454	0,59	0,557
Região 90°	6	0,312	0,421	0,358
	7	0,63	0,377	0,418
	8	0,84	0,374	0,399
	9	0,263	0,352	0,345
	10	0,308	0,318	0,443
Região 180°	11	0,311	0,584	0,3685
	12	0,352	0,363	0,384
	13	0,316	0,417	0,407
	14	0,272	0,353	0,332
	15	0,278	0,388	0,5

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 44 apresenta os valores máximos e mínimos do parâmetro Ra obtidos em cada cone. Pode se observar que os valores máximos encontrados ficaram bem próximos, já o valor mínimo ocorreu uma pequena variação de $0,05\mu\text{m}$ somente para cone 1.

Figura 44 – Valores máximo e mínimos de rugosidade média

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 14 apresenta os valores de rugosidade superficial obtidos no parâmetro R_q , medido ao longo do cone reto, foi utilizado o mesmo procedimento de coleta de dados do parâmetro R_a .

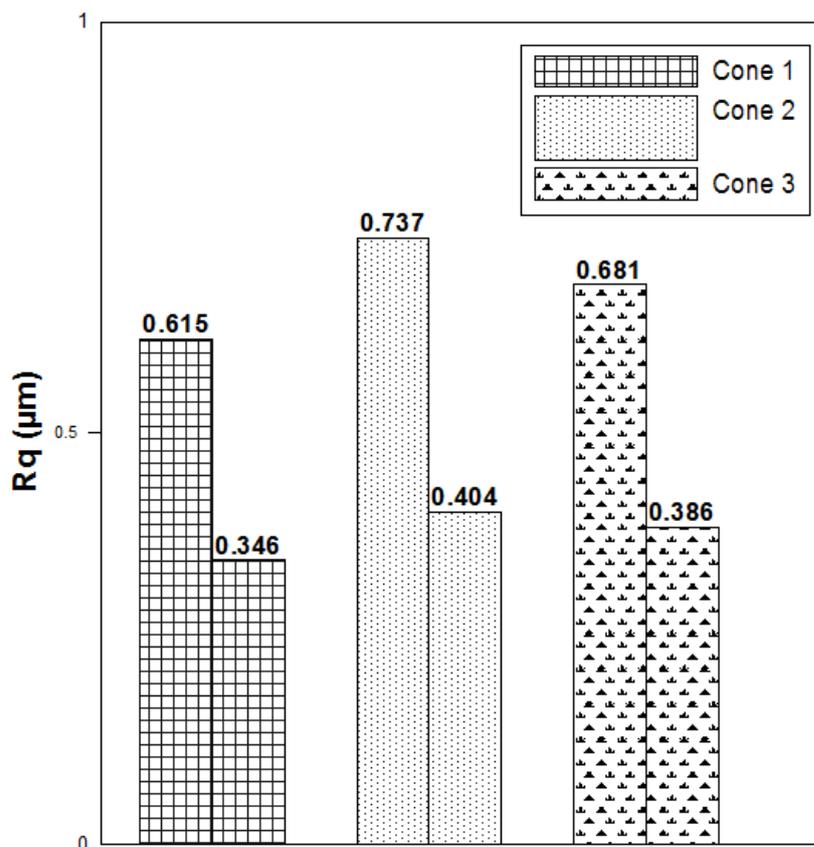
Tabela 14 – Raiz quadrada das médias dos quadrados

		Cone 1	Cone 2	Cone 3
		Rq (μm)	Rq (μm)	Rq (μm)
Região 0°	1	0,547	0,414	0,498
	2	0,514	0,562	0,494
	3	0,499	0,573	0,521
	4	0,463	0,404	0,386
	5	0,615	0,73	0,681
Região 90°	6	0,393	0,541	0,476
	7	0,466	0,533	0,52
	8	0,499	0,469	0,497
	9	0,346	0,433	0,445
	10	0,381	0,416	0,573
Região 180°	11	0,407	0,737	0,487
	12	0,497	0,458	0,507
	13	0,386	0,502	0,509
	14	0,353	0,453	0,4155
	15	0,347	0,485	0,327

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 45 apresenta o gráfico com o parâmetro Rq nos pontos máximo e mínimos encontrados na peça estampadas. É possível observar que o cone 2 apresentou maior diferenciação entre o valor máximo e o mínimo, em relação aos outros resultados.

Figura 45 – Valores máximo e mínimos Rq



Fonte: Elaborado pelo autor

5.7 Tratamento estatístico

Foram utilizados os 15 valores de cada parâmetro, ou seja R_a (μm) e R_q (μm) de cada cone reto estampado conforme as Tabelas 10 e 11. Aplicou-se o teste estatístico Anova com o objetivo de analisar a diferença entre médias aritméticas dos valores mensurados. Foi utilizado um grau de significância de 95%, para realização do teste de hipótese Anova tanto para o parâmetro R_a quanto R_q . A Tabela 15 apresenta a média e variância dos valores obtidos para o parâmetro R_a .

Tabela 15 – Média e variância das amostras

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Cone 1 Ra (μm)	15	6,142	0,409467	0,025853
Cone 2 Ra (μm)	15	6,254	0,416933	0,00681
Cone 3 Ra (μm)	15	5,9745	0,3983	0,004087

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado apresentado na Tabela 16 mostra que o valor obtido para o fator F ficou abaixo do valor F-crítico. Isto indica que estatisticamente as médias aritméticas dos valores Ra (μm) são iguais.

Tabela 16 – Anova Ra

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	Valor-P	F Crítico
Entre grupos	0,002638	2	0,001319	0,107683	0,898159	3,219942
Dentro dos grupos	0,5145	2	0,01225			
Total	0,517138	44				

Fonte: Elaborado pelo autor

O mesmo procedimento foi utilizado para a análise valores obtidos no parâmetro Rq. A Tabela 14 apresenta a média e variância das amostras Rq (μm).

Tabela 17 – Média e variância das amostras

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Cone 1 Ra (μm)	15	6,713	0,447533333	0,006633124
Cone 2 Ra (μm)	15	7,71	0,514	0,010813714
Cone 3 Ra (μm)	15	7,3365	0,4891	0,00651165

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado apresentado na Tabela 18, mostra que o valor obtido para o fator F ficou abaixo do valor F-crítico. Isto indica que estatisticamente as médias aritméticas dos valores Rq (μm) também são iguais.

Tabela 18 – Anova Rq

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	Valor-P	F Crítico
Entre grupos	0,0338280	2	0,016914	2,11791	0,1329480	3,2199422
Dentro dos grupos	0,3354188	42	0,007986			
Total	0,369246	44				

Fonte: Elaborado pelo autor

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a influência de duas ferramentas de contato sendo uma com ponta rotativa e outra com ponta rígida na estampagem incremental de uma liga de alumínio estampada em uma máquina convencional CNC, pode-se concluir:

- a) A ferramenta rotativa projetada e construída neste trabalho é composta por três partes distintas, o suporte de fixação, a capa rosqueável e uma esfera de rolamento. Ao longo do trabalho fez-se necessário ajustes no comprimento do suporte de fixação e na capa rosqueável, devido a limitação do equipamento(CNC) utilizado e o contato entre capa/peça. Após todos os ajustes a ferramenta foi testada e apresentou comportamento eficiente em todos os testes.
- b) A metodologia utilizada na obtenção do ângulo limite conforme Lopes (2013), foi eficiente principalmente pela redução do número de experimentos, comparado com Patrício(2011). O valor encontrado para o ângulo limite da liga de alumínio EN AW-1100 espessura 1mm, com utilização da melhor condição de estampagem obtida, ou seja, ferramenta rotativa e lubrificação a base de vaselina foi de $76,434^\circ$. Quando comparado com os valores encontrados por Jeswiet (2005) na liga de alumínio AL 3003-0, espessuras de 1,2mm e 1,3mm o valor é bem próximo 67° , e $72,1^\circ$.
- c) Os menores valores obtidos para o ângulo limite com utilização da ferramenta rígida e rotativa foram na condição sem lubrificação. Os valores encontrados foram de $57,854^\circ$ com desvio padrão de $1,197^\circ$ e de $71,653^\circ$ com desvio padrão $1,006^\circ$ para a ferramenta rígida e rotativa respectivamente. A peça obtida com a ferramenta rígida apresentou um defeito parecido com “casca de laranja”.
- d) Os maiores valores obtidos para o ângulo limite com utilização da ferramenta rígida e rotativa foram na condição vaselina. Os valores encontrados foram de $72,987^\circ$ com desvio padrão de $1,549^\circ$ e de $76,434^\circ$ com desvio padrão $0,257^\circ$ para a ferramenta rígida e rotativa

respetivamente. A peça obtida com a ferramenta rotativa apresentou acabamento espelhado em sua superfície interna.

- e) A condição de lubrificação com uso de grafite apresentou ângulo limite de $62,901^\circ$ com desvio padrão de $2,152^\circ$ para ferramenta rígida e para ferramenta rotativa apresentou ângulo limite de $68,680^\circ$ com desvio padrão de $2,939^\circ$. Em ambas as peças após limpeza com álcool isopropílico observou-se que a tonalidade da superfície que esteve em contato com o grafite ficou fosca. Faz-se necessário verificar por MEV se ocorreu aderência do lubrificante grafite em pó na superfície do material.
- f) Quando verificado o comportamento da espessura ao longo da geratriz de um cone reto no ângulo limite e na melhor condição ferramenta/lubrificante, observa-se que ocorreu variação ao longo do comprimento mensurado.
- g) O teste Anova se mostrou eficiente na avaliação da resposta ao comportamento da rugosidade superficial R_a e R_q na peça estampada com geometria de cone reto. O valor F calculado foi menor que F -crítico para ambos parâmetros estudados, logo o resultado indica que estatisticamente as médias aritméticas dos valores da classe de rugosidade $R_a(\mu\text{m})$ são iguais e $R_q(\mu\text{m})$ também.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Analisar parâmetros de acabamento superficial com variação da rotação da ferramenta, nas condições com vaselina e sem lubrificação.
- b) Realizar teste com ferramenta rotativa em chapa de aço.
- c) Realização de estudo em elementos finitos para análise de deformação e atrito.
- d) Utilizar estratégia helicoidal para estampagem incremental de cone reto.
- e) Utilizar pré-aquecimento para a conformação do material em liga com alta resistência como titânio para definir se há uma melhora no processo de conformação ou se as propriedades da conformação não se alteram.
- f) Avaliar a mudança da estratégia de trajetória da ferramenta, helicoidal e incremental bidimensional.
- g) Realizar teste de ferramenta de contato não-hemisférico, para induzir estados de deformação onde se consiga uma maior estampabilidade.
- h) Comparar ferramenta rotativa com ferramenta rígida com processo SPIN.

REFERÊNCIA

AMBROGIO, G. et al. On the high-speed Single Point Incremental Forming of titanium alloys. **Manufacturing Technology**. 2013 v.62 p. 243–246.

ARNOLD, Anderson. et al. **Friction, Lubrication, and Wear Technology**. Volume 18 of the ASM Handbook 1992. The Volume was prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee.

AZAOUZI, Mohamed; NADHIR, Lebaal. Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method. **Simulation Modelling Practice and Theory**. 2012 v. 24 p. 49–58.

BAGUDANCH. et al. Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride. **Journal of Cleaner Production**. 2016 , v. 112 p. 1013-1024.

BAGUDANCH. et al. Incremental forming of polymers: process parameters selection from the perspective of electric energy consumption and cost. **Journal of Materials Processing Technology**. 2015, v. 219 p. 221 -229.

BHUSHAN, Bharat. **Introduction to tribology**. New York: John Wiley & Sons, 2002. xix, 732 p.

BLAGA, Adrian; OLESKSIK, Valentin Zhang, Tao. A Study on the Influence of the Forming Strategy on the Main Strains, Thickness Reduction, and Forces in a Single Point Incremental Forming Process. **Advances in Materials Science and Engineering**. 2013, v. 2013 p. 10-10.

BORREGO, M. et al. Experimental study of hole-flanging by single-stage incremental sheet forming. **Journal of Materials Processing Technology**. 2016, v. 237 p. 320–330.

CALLISTER, William. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, c2002. p. 589.

CRISTINO, V.A. et al. Fracture in hole-flanging produced by single point incremental forming. **International Journal of Mechanical Sciences**. 2014, v. 83 p. 146–154.

DA SILVA, Allison Duarte. et al. Utilização de Dados sobre Materiais em Simulações Computacionais de Conformação Mecânica. In: 35º SENAFOR – 19º Conferência Internacional de Forjamento, 2015, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2015.

DALEFFE, Anderson. **Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de alumínio puro**. 2008. 100f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Matérias, Centro de

Tecnologia da Escola de Engenharia da Universidade Federal Rio do Grande Sul, Porto Alegre, 2008.

DAVARPANA, Mohammad Ali. et al. Effects of incremental depth and tool rotation on failure modes and microstructural properties in Single Point Incremental Forming of polymers. **Journal of Materials Processing Technology**. 2015, v. 222 p.287-300.

DIETER, George. **Metalurgia Mecânica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1996.

DONGKAI, Xu. et al. Modeling and optimization of surface roughness in single point incremental forming process. **The Journal of Materials Research and Technology**. 2015, v. 4 p. 304-313.

DURANTE. et al. The influence of tool rotation on an incremental forming process. **Journal of materials processing technology**. 2008, v. 209 n.9 p. 4621 -4626.

DURANTE. et al. T Observations on the Influence of Tool-Sheet Contact Conditions on an Incremental Forming Process. **Journal of Materials Engineering and Performance**. 2010, v. 20 p. 941-946.

FOLLE, Luiz Fernando. **Estudo do coeficiente de atrito para o processo de estampagem**. 2012. 124f. Dissertação (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

GUZMÁN, Carlos Felipe; et all. Study of the geometrical inaccuracy on a SPIF two-slope pyramid by finite element simulations. **International Journal of Solids and Structures**. Chile v. 49, f. 25 p. 1594-3604, 2012.

HEDI, Arfa; R. et all. Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminium sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts. **International Journal of Material Forming**, France v. 6, n. 4 p. 483, 2013.

HORTA, Daniel Miranda. **Análise do estado limite do aço AISI 304 conformado através do processo de conformação incremental de contato**. 2015. 88f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

INAGARAO, Giuseppe. et al. A comprehensive analysis of electric energy consumption of single point incremental forming processes. **Journal of Cleaner Production**, 2014, v. 54, n. 2, p.623-649.

JESWIET, Jack. et al. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. CIRP Annals - **Manufacturing Technology**, 2005, v. 54, n. 2, p.623-649.

JESWIET, Jack. et al. Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 59, Issue 1, p. 311-314. 2010.

KEELER, Sandro. The Barrier Lubricants Are Coming. **Magazine Metal Forming**. p. 72-73, August 2001.

KLANN, Rui. Lubricants for high-Speed Stamping. **Magazine Metal Forming**. p.30-33, December 2000.

LEVINE, David. et al. **Estatística: teoria e aplicações usando Microsoft Excel em português**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, c2012. xxv, p. 804.

LOPES, Tiago Filipe Ramos da Silva. **Estampagem Incremental: Compensação do Retorno Elástico e Análise à Rotura**. 2013. 156f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Integrado em Engenharia Mecânica. Porto, 2013.

MANN, Prem. **Introdução à estatística**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, c2006. p.758.

MALHOTRA, R. et al. A new methodology for multi-pass single point incremental forming with mixed toolpaths. **Manufacturing Technology**. 2011 v.20 p.323–326.

MACIEL, Daniel de Castro. et al. Tools avaliation for a maximum angle characterization on a single point incremental stamping with aluminum 1100 alloy. In: **5th International Conference on Integrity - Reliability - Failure, 2016, Porto**. Experimental Mechanics. Porto: INEGI-Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, 2016. v. 1. p. 51-51.

MACIEL, Daniel de Castro; SILVA, Gilmar Cordeiro Da; SANTOS, Ítalo Bruno dos. Avaliação da ferramenta no estudo da estampagem incremental. In: 35º SENAFOR Conferência Internacional de Forjamento, 18ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas 5ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas, 2º Congresso do BrDDRG 2015, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2015.

MACIEL, Daniel de Castro. et al. The influence of the lubrication in the surface roughness in the incremental sheet forming process. **23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering**. Rio de Janeiro, 2015a.

MAXIMILIANO, GERSON; et al. Estampagem incremental de múltiplos passes em chapa de latão c-268. In: 36º SENAFOR Conferência Internacional de Forjamento, 19ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas 5ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas, 2º Congresso do BrDDRG 2016, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2016.

MARTINS, P.A.F.; et al. Single point incremental forming of polymers. **Manufacturing Technology**. 2009, v. 58 p. 229–232.

MYOUNG-SUP, Shim; JONG-JIM, Park. The formability of aluminium sheet in incremental forming. **Journal of Materials Processing Technology**. 2001 , v. 113 p. 654 -658.

NOVASKI, Olívio. **Introdução a engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: E. Blucher, c1994. p.119.

OLIVEIRA, Claudinei José de. **Interação dinâmica entre irregularidades dimensionais em componentes mecânicos que trabalham em movimento de rotação**. 2010. 165f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

PATRÍCIO, Lúcio Flávio Santos. **Estampagem incremental de chapas: aplicação em aço comercial automotivo**. 2011. 251f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

RODRIGUES, Pedro Felipe das. **Aplicação da estampagem incremental no fabrico de moldes: Estudo de viabilidade técnico-económica para industrialização**. 2013. 91f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Integrado em Engenharia Mecânica. Porto, 2013.

SHIM, Myoung-Sup; PARK, Jong-Jin. The formability of aluminium sheet in incremental forming. **Journal of Materials Processing Technology**.2001, v.113 n. 1 p.654 -658.

SHRINIDHI, Chandrasekharan. et al. Evaluation of stamping lubricants at various temperature levels using the ironing test.International. **Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 45, issues 4 5, p. 379-388, april 2005.

SILVA, Gilmar Cordeiro Da. **Simulação numérica e experimental no processo de extrusão indireta a frio**. 2011. 176f. Tese (Doutorado) - Belo Horizonte, 2011. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

SILVA, Pablo Josué Da. **Estampagem incremental utilizada para prototipagem de peças de aço ABNT 1008 e ABNT 304**. Dissertação (Mestrado) – Brasília, 2011 Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia de Brasília. Brasília, 2011.

STEMLER, Pedro Malaquias Araújo. et al. **Investigação da Influência do Material na Precisão Geométrica de Engrenagens Forjadas a Frio**. In: 35º SENAFOR – 19º Conferência Internacional de Forjamento, 2015, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2015.

MCANULTY, T., et al.,.Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. 2016.

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

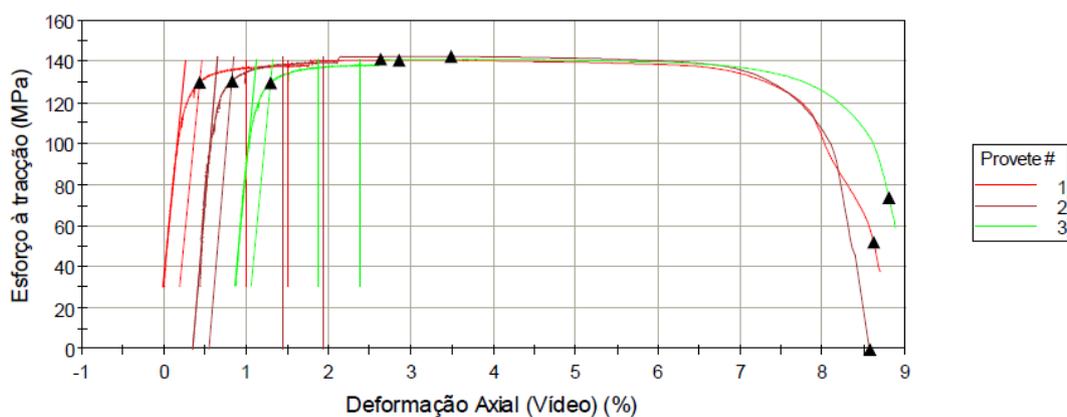
WITTE, ROBERT; WITTE, JOHN. **Estatística**. 7. ed. Rio de Janeiro. RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos, c2005. xx, p. 486.

YANLE, Li. et al. Efficient force prediction for incremental sheet forming and experimental validation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2014 v.73 n.1 p. 571 -587.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Ensaio de tração nas direções de laminação 0°

Corpo de prova 1 a 3

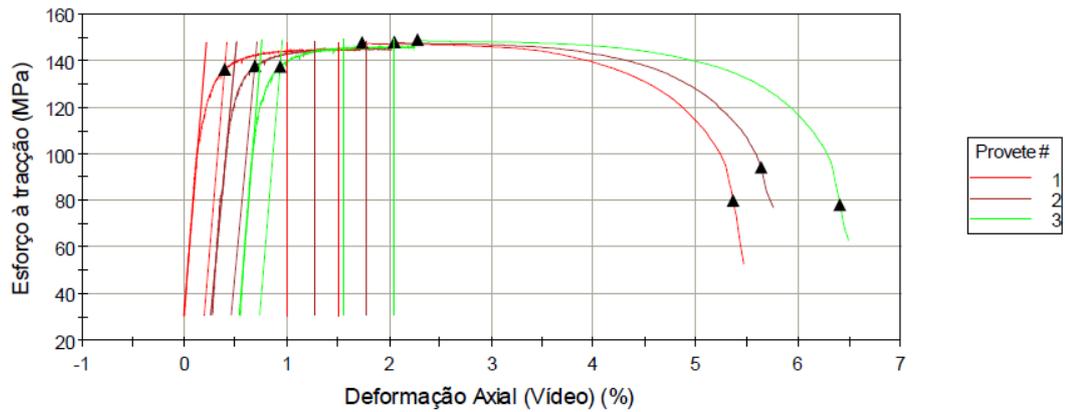


	Espessura (mm)	Largura (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
1	1,00	12,85	129,76	140,47	8,61
2	1,00	12,73	130,20	142,24	8,13
3	1,00	12,78	129,32	140,80	7,93
Mínimo	1,00	12,73	129,32	140,47	7,93
Máximo	1,00	12,85	130,20	142,24	8,61
Média	1,00	12,79	129,76	141,17	8,22
Desvio Padrão	0,00	0,06	0,44	0,95	0,35

	Valor n (Deformação 4 %, 6 %)	Valor n (Deformação 10 %, 17%)	r	Módulo (Módulo E)
	()	()	()	(GPa)
1	0,03	0,03	0,26	40,34
2	0,03	0,03	0,40	46,63
3	0,03	0,03	0,33	42,24
Mínimo	0,03	0,03	0,26	40,34
Máximo	0,03	0,03	0,40	46,63
Média	0,03	0,03	0,33	43,07
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,07	3,23

Ensaio de tração a 45° do sentido de laminação

Corpo de prova 1 a 3

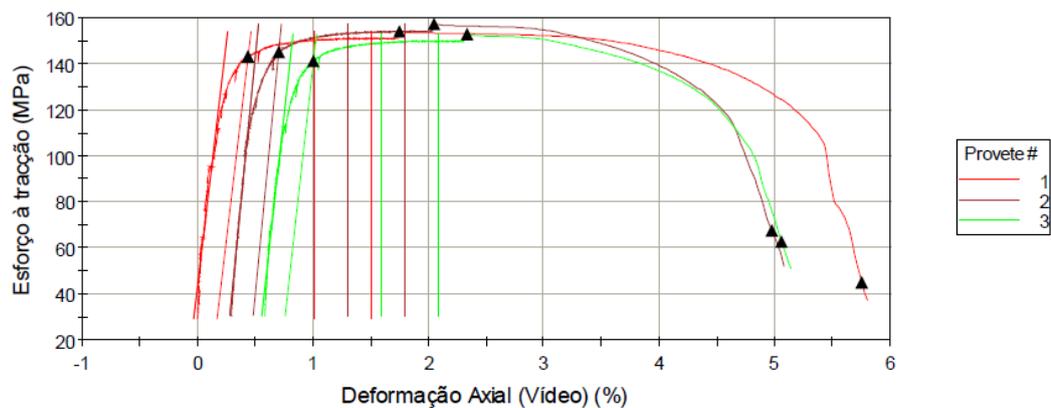


	Espessura (mm)	Largura (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
1	1,00	12,68	136,15	147,57	5,36
2	1,00	12,67	137,59	147,85	5,35
3	1,00	12,67	137,34	148,72	5,86
Mínimo	1,00	12,67	136,15	147,57	5,35
Máximo	1,00	12,68	137,59	148,72	5,86
Média	1,00	12,67	137,03	148,05	5,52
Desvio Padrão	0,00	0,01	0,77	0,60	0,29

	Valor n (Deformação 4 %, 6 %)	Valor n (Deformação 10 %, 17%)	r ()	Módulo (Módulo E) (GPa)
1	0,02 ()	0,02 ()	0,50	53,14
2	0,02	0,02	0,64	46,14
3	0,02	0,02	0,55	53,60
Mínimo	0,02	0,02	0,50	46,14
Máximo	0,02	0,02	0,64	53,60
Média	0,02	0,02	0,56	50,96
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,07	4,18

Ensaio de tração a 90° do sentido de laminação

Corpo de prova 1 a 3



	Espessura (mm)	Largura (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
1	1,00	12,78	143,18	153,78	5,75
2	0,98	12,80	144,84	156,93	4,68
3	1,00	12,90	141,07	152,60	4,47
Mínimo	0,98	12,78	141,07	152,60	4,47
Máximo	1,00	12,90	144,84	156,93	5,75
Média	0,99	12,83	143,03	154,44	4,96
Desvio Padrão	0,01	0,06	1,89	2,24	0,69

	Valor n (Deformação 4 %, 6 %) ()	Valor n (Deformação 10 %, 17%) ()	r ()	Módulo (Módulo E) (GPa)
1	0,02	0,02	<0,97	42,13
2	0,03	0,03	<1,32	51,20
3	0,02	0,02	<0,59	44,91
Mínimo	0,02	0,02	0,59	42,13
Máximo	0,03	0,03	1,32	51,20
Média	0,02	0,02	0,96	46,08
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,37	4,65

CONE 1

ROTAÇÃO 0°	Ra (µm)	Rq (µm)	RSK	RKU
DIÂMETRO 1	0,435	0,547	0,432	3,31
DIÂMETRO 2	0,411	0,514	0,284	3,41
DIÂMETRO 3	0,39	0,499	-0,163	3,32
DIÂMETRO 4	0,57	0,463	-0,81	3,96
DIÂMETRO 5	0,454	0,615	0,00879	4,32
ROTAÇÃO 90°	Ra (µm)	Rq (µm)	RSK	RKU
DIÂMETRO 1	0,312	0,393	-0,0807	2,9
DIÂMETRO 2	0,63	0,466	-0,431	3,18
DIÂMETRO 3	0,84	0,499	-0,737	4,6
DIÂMETRO 4	0,263	0,346	-0,1	3,7
DIÂMETRO 5	0,308	0,381	-0,168	2,98
ROTAÇÃO 180°	Ra (µm)	Rq (µm)	RSK	RKU
DIÂMETRO 1	0,311	0,407	0,168	3,7
DIÂMETRO 2	0,352	0,497	0,13	2,99
DIÂMETRO 3	0,316	0,386	0,11	2,86
DIÂMETRO 4	0,272	0,353	-0,432	3,98
DIÂMETRO 5	0,278	0,347	-0,179	2,83

CONE 2

	Ra (μm)	Rq (μm)	RSK	RKU
DIÂMETRO 1	0,343	0,414	-0,116	2,38
DIÂMETRO 2	0,445	0,562	-0,272	3,01
DIÂMETRO 3	0,438	0,573	-0,255	3,9
DIÂMETRO 4	0,491	0,604	-0,36	2,85
DIÂMETRO 5	0,59	0,73	-0,0104	2,73
ROTAÇÃO 90°				
	Ra (μm)	Rq (μm)	RSK	RKU
DIÂMETRO 1	0,421	0,541	-0,224	4,08
DIÂMETRO 2	0,377	0,533	-0,101	6,94
DIÂMETRO 3	0,374	0,469	0,00968	2,82
DIÂMETRO 4	0,352	0,433	-0,105	2,54
DIÂMETRO 5	0,318	0,416	-0,351	3,6
ROTAÇÃO 180°				
	Ra (μm)	Rq (μm)	RSK	RKU
DIÂMETRO 1	0,584	0,737	-0,575	3,23
DIÂMETRO 2	0,363	0,458	0,0183	3,1
DIÂMETRO 3	0,417	0,552	-0,245	2,97
DIÂMETRO 4	0,353	0,453	-0,706	4,22
DIÂMETRO 5	0,388	0,485	-0,14	2,92

CONE 3

ROTAÇÃO 0°	Ra (μm)	Rq (μm)	RSK	RKU
DIÂMETRO 1	0,379	0,498	-0,364	3,42
DIÂMETRO 2	0,35	0,494	-0,841	5,29
DIÂMETRO 3	0,415	0,521	-0,422	3,28
DIÂMETRO 4	0,319	0,386	-0,0701	3,01
DIÂMETRO 5	0,557	0,681	-0,0113	2,68
ROTAÇÃO 90°	Ra (μm)	Rq (μm)	RSK	RKU
DIÂMETRO 1	0,358	0,476	-0,449	3,65
DIÂMETRO 2	0,418	0,52	0,159	2,92
DIÂMETRO 3	0,399	0,497	-0,638	3,35
DIÂMETRO 4	0,345	0,445	-0,301	3,89
DIÂMETRO 5	0,443	0,573	-0,613	3,92
ROTAÇÃO 180°	Ra (μm)	Rq (μm)	RSK	RKU
DIÂMETRO 1	0,3685	0,487	-0,4065	3,535
DIÂMETRO 2	0,384	0,507	-0,341	4,105
DIÂMETRO 3	0,407	0,509	-0,53	3,315
DIÂMETRO 4	0,332	0,4155	0,18555	3,45
DIÂMETRO 5	0,5	0,627	0,31215	3,3