



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia Automotiva**

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE LIGA DE  
ALUMÍNIO 1100**

**Autor: André do Nascimento Delgado  
Orientador: Rhander Viana**

**Brasília, DF  
2023**



**André do Nascimento Delgado**

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE LIGA DE ALUMÍNIO  
1100**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Dr. Rhander Viana

Co-Orientador:

**Brasília, DF  
2023**

## **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Delgado, André do Nascimento.

Estampagem Incremental de Liga de Alumínio 1100/ André do Nascimento Delgado. Brasília: UnB, 2023. 103 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2023. Orientação: Rhander Viana.

1. Estampagem Incremental. 2. Alumínio 1100. 3. Ângulo de parede I. Viana, Rhander. II. Estampagem Incremental de Liga de Alumínio 1100

CDU Classificação

- A ficha catalográfica oficial deverá ser solicitada à Biblioteca pelo aluno após a apresentação.



**ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE LIGA DE ALUMÍNIO  
1100**

**André do Nascimento Delgado**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação 24/07/23) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof.: Rhander Viana, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof.: Danilo dos Santos Oliveira, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

---

**Prof.: Paolo Gessini, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2023

Esse trabalho é dedicado às crianças adultas que quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, minha mãe, Evani, minha irmã, Patrícia, e minha tia Iracema, por sempre me ajudarem e me apoiarem nas minhas decisões.

Agradeço também ao meu orientador, professor Rhander e aos técnicos do laboratório Danilo e também ao Mateus, por toda ajuda e orientação que me deram durante a realização do trabalho.

Agradeço também a todos os meus amigos que sempre me ajudaram durante minha jornada acadêmica das mais diversas formas.

O homem é a medida de todas as coisas.  
Protágoras.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar o comportamento do Alumínio 1100 submetido ao processo de Estampagem Incremental de Chapas (*ISF - Incremental Sheet Forming*), do tipo Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF - Single Point Incremental Forming). Esse tipo de processo tem se destacado devido sua simplicidade de execução e a sua alta versatilidade quanto aos elementos a serem confeccionados, sendo muito utilizado no desenvolvimento de produtos (prototipagem) e na produção de peças em pequenas escalas. Para realização dos testes, foram utilizados os *softwares* CAD/CAM (Catia V5R21® e Fusion 360®), centro de usinagem CNC com três eixos, ferramenta de aço ABNT 1045 com ponta semiesférica e diâmetro de 13 mm, prensa chapas, chapas de alumínio 1100 de 0,5 mm de espessura e óleo lubrificante 5w30. Os testes tiveram como objetivo verificar o ângulo máximo de parede da geometria proposta, um tronco de cone, até que ocorresse o rompimento da chapa e identificar as condições em que isso ocorreu. Foram realizados também ensaios de estampagem utilizando um planejamento fatorial 2<sup>2</sup>, com variação do passo e do avanço da ferramenta. Os resultados obtidos mostraram que o ângulo máximo para a estampagem da geometria do tronco de cone, sem ocorrência de rompimento da chapa, foi de 56°5'. Os resultados obtidos no planejamento fatorial mostraram que o passo da ferramenta tem maior influência na rugosidade da peça obtida do que o avanço.

**Palavras-chave:** Estampagem incremental, Alumínio 1100, Ângulo de parede, Planejamento Fatorial, Rugosidade.

## ABSTRACT

The objective of this work is to investigate the behavior of Aluminum 1100 subjected to the Incremental Sheet Forming process (ISF - Incremental Sheet Forming), of the Single Point Incremental Forming SPIF - Single Point Incremental Forming type. This type of process has stood out due to its simplicity of execution and its high versatility in terms of the elements to be manufactured, being widely used in product development (prototyping) and in the production of parts on small scales. To carry out the tests, CAD/CAM software (Catia V5R21® and Fusion 360®), a three-axis CNC machining center, a semi-spherical tip tool, plate press, and 0.5 mm thick 1100 aluminum plates will be used. lubricant. The tests aimed to verify the maximum wall angle of the geometry until material rupture occurred for this plate and to identify the conditions in which this occurred. The results obtained for the tests showed that the maximum angle for the truncated cone geometry for the 0.5 mm aluminum plate and 13 mm 1045 steel tool and using 5w30 lubricating oil, was 56°.5'. A 2<sup>2</sup> factorial design was also carried out using Step and Feed as factors and whose result was that the Step is more influential in the roughness of the piece in relation to the Feed.

**Keywords:** Incremental stamping, Aluminum 1100, Wall angle, Factorial Design, Roughness.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de processo de estampagem incremental de ponto simples. ....	19
Figura 2 – Execução do processo de estampagem incremental de ponto simples. --	20
Figura 3 - Estampagem incremental simétrica conforme à patente. ....	21
Figura 4 - Tipos de estampagem incremental assimétrica. ....	22
Figura 5 – Esquema de estampagem incremental de ponto simples (SPIF). ....	23
Figura 6 - Variação da temperatura em função da rotação da ferramenta (CW – sentido horário) e (ACW – sentido anti-horário). ....	26
Figura 7 - Parâmetros da ferramenta para cálculo da velocidade angular (Avanço). 27	
Figura 8 - Modelos de ferramentas para ISPF. ....	30
Figura 9 - Exemplos da relação entre espessura e ângulo de parede no SPIF. ....	32
Figura 10 - Ilustração do processo com variação da angulação com a profundidade. ....	33
Figura 11 - Rugosidade em função do passo, raio de ferramenta e ângulo de parede. ....	34
Figura 12 - Formação do <i>Scallop</i> . ....	35
Figura 13 - a) Incremento vertical com passe constante. b) Incremento vertical com passe variável. ....	35
Figura 14 - Máquina dedicada ao SPIF. ....	38
Figura 15 - Robô realizando o SPIF. ....	39
Figura 16 - Modelo de máquina CNC. ....	40
Figura 17 - Parâmetro Ra. ....	42
Figura 18 - Curva tensão-deformação para engenharia. ....	46
Figura 19 – Ferramenta semiesférica utilizada nos testes. ....	47
Figura 20 – Modelo do prensa chapas em CAD. ....	48
Figura 21 - Geometria de estampagem. ....	49
Figura 22 - Caminho da ferramenta gerado após considerados todos os parâmetros de teste no software (geometria, passo, avanço, rotação...). ....	49
Figura 23 - Chapa de alumínio 1100 cortada e furada. ....	51
Figura 24 - Centro de usinagem CNC para realização dos testes. ....	52
Figura 25 - Fluxograma de teste para análise do ângulo máximo de parede. ....	54
Figura 26 - Rugosímetro digital <i>Mitutoyo SJ-210</i> . ....	56
Figura 27 – Locais de medição da rugosidade. ....	57
Figura 28 - Medição da rugosidade. ....	57
Figura 29 - Geometria com ângulo de 54° a) vista superior. b) vista lateral. ....	60
Figura 30 - Geometria com ângulo de 59°. ....	61
Figura 31 - Geometria com ângulo de 54°, 75'. a) vista superior. b) vista lateral. ....	62
Figura 32 - Geometria com ângulo de 55°, 25'. a) vista superior. b) vista lateral. ....	63
Figura 33 - Geometria com ângulo 56°, 5'. a) vista superior. b) vista lateral. ....	64
Figura 34 - Gráfico das rugosidades para cada ângulo de parede obtido. ....	68
Figura 35 - Planejamento fatorial: Testes 1 e 2. a) vista superior teste 1, b) vista lateral do teste 1, c) vista superior teste 2 e d) vista lateral teste 2. ....	70
Figura 36 - Planejamento fatorial: Testes de 3 e 4. a) e A): vista superior; b) e B): vistas laterais; testes 3 e 4 respectivamente. ....	71
Figura 37 - Planejamento fatorial: Testes 5 e 6. a) e A): vistas superiores e b) e B) vistas laterais dos testes 5 e 6 respectivamente. ....	72
Figura 38 - Planejamento fatorial. Testes 7 e 8. a) e A): vistas superiores e b) e B) vistas laterais dos testes 7 e 8 respectivamente. ....	73
Figura 39 - Planejamento fatorial. Testes 9 e 10. a) e A): vistas superiores e b) e B) vistas laterais dos testes 9 e 10 respectivamente. ....	74

Figura 40 - Planejamento fatorial. Testes 11 e 12. a) e A): vistas superiores e b) e B) vistas laterais dos testes 5 e 6 respectivamente. ....	75
Figura 41 - Todos os testes do Planejamento fatorial. ....	76
Figura 42 - Gráfico do Efeito Principal do Passo. ....	79
Figura 43 - Gráfico do Efeito Principal do Avanço. ....	79
Figura 44 - Gráfico de interações pela perspectiva do Passo. ....	80
Figura 45 - Gráfico de interações pela perspectiva do Avanço. ....	81
Figura 46 - Superfície de resposta na perspectiva do Passo. ....	81
Figura 47 - Superfície de resposta sob a perspectiva do Avanço. ....	82
Figura 48 - Regressão linear: estatística de influência dos parâmetros na resposta. ....	83
Figura 49 - Regressão linear. Análise de influência de cada parâmetro e demonstração da equação de respostas. ....	83
Figura 50 - Cronograma de atividades. ....	85

### LISTA DE QUADROS

Tabela 1 - Influência do raio da ferramenta em alguns parâmetros de conformação. ....	28
Tabela 2 - Propriedades dos materiais de revestimento. ....	29
Tabela 3 - Comparativo de propriedades de diferentes metais. ....	44
Tabela 4 - Valores de ensaios de tração para o Alumínio 1100. ....	46
Tabela 5 - Dados da CNC D600. ....	52
Tabela 6 - Fatores e seus níveis. ....	58
Tabela 7 - Rugosidades para chapa sem conformação. ....	65
Tabela 8 - Rugosidades para geometria de 54°. ....	66
Tabela 9 - Rugosidades para geometria 55,25'. ....	66
Tabela 10 - Rugosidades para geometria de 56°, 5'. ....	67
Tabela 11 - Matriz de planejamento. ....	69
Tabela 12 - Rugosidades medidas no planejamento fatorial. ....	76

### LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>SIGLAS</b>	
3D:	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACW:	Rotação de ferramenta no sentido anti-horário
CAD:	Computer Aided Design (Desenho assistido por computador)
CAM:	Computer Aided Manufacturing (Manufatura Auxiliada por Computador)
CNC:	Computer Numeric Control (Comando Numérico Computadorizado)
CFC:	Cúbica de Face Centrada
CrN:	Nitreto de Cromo
CW:	Rotação de ferramenta em sentido horário
FGA:	Faculdade Gama

IACS:	International Annealed Copper Standard (medida de condutividade elétrica com base no cobre)
IFB	Instituto Federal Brasília
ISF:	Incremental Sheet Forming (Estampagem Incremental de Chapas)
P&D:	Pesquisa e Desenvolvimento
SAE:	Society of Automotive Engineers (Sociedade dos Engenheiros Automotivos)
SPIF:	Single Point Incremental Forming (Estampagem Incremental de Ponto Simples)
TiCN:	Carbonitreto de Titânio
TiN:	Nitreto de Titânio
TPFI:	Two Point Incremental Forming (Estampagem Incremental de Ponto Duplo)
UnB:	Universidade de Brasília

## SÍMBOLOS

Símbolo	Unidade típica	Descrição
mm:		Milímetro (Unidade de medida de comprimento)
rpm:		Rotações por Minuto (Unidade de média de velocidade angular)
°C:		Graus Celsius (Unidade de medida de Temperatura)
$\Delta T$ :	[°C]	Variação de Temperatura
$w$ :	[rpm]	Velocidade angular da ferramenta
$V_{fh}$ :	[mm/min]	Velocidade de Avanço da ferramenta
$z$ :	[mm]	Avanço da ferramenta na direção do eixo Z
$\pi$ :		Pi (Constante de proporção numérica entre a circunferência e seu diâmetro)
$RT$ :	[mm]	Raio da ferramenta
$\alpha$ :	[°]	Ângulo de parede da geometria

°:		Graus (Unidade de medida de ângulo)
t1:	[mm]	Espessura final da chapa
t0:	[mm]	Espessura inicial da chapa
µm:		Micrometro (Unidade de medida de comprimento)
%:		Percentual
Ra:	[µm]	Rugosidade média
lm:	[µm]	Comprimento da amostra
Rq:	[µm]	Amplitude entre o maior pico e maior vale
Rz:	[µm]	Rugosidade singular média
Zi:	[µm]	Rugosidade singular
lv:	[µm]	Trajeto prévio
le:	[µm]	Trajeto unitário
ln:	[µm]	Trajeto posterior
lt:	[µm]	Trajeto do apalpador
g/cm <sup>3</sup> :		Gramas por centímetros cúbicos (Unidade de medida de densidade)
Cal/cm°C:		Calorias por centímetros vezes Graus Celsius (Unidade de medida de condução de calor)
Cal:		Calorias (Unidade de quantidade de calor)
MPa:		Mega Pascal (Unidade de medida de pressão/tensão)
cm:		Centímetros (Unidade de medida de comprimento)
kVA:		Quilo Voltamper (Unidade de medida de potência aparente)
cv:		Cavalo-vapor (Unidade de medida de potência)
min:		Minutos (Unidade de medida de tempo)
kg:		Quilogramas (Unidade de medida de massa)
N:		Newtons (Unidade de medida de força)
HV:		Dureza de Vickers (Unidade de medida de dureza)
ml:		Mililitros (Unidade de medida de volume)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1. OBJETIVOS.....	17
1.1.1. Objetivo geral.....	17
1.1.2. Objetivos específicos.....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1. ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	18
2.1.1. Estampagem.....	18
2.1.2. Estampagem Incremental.....	18
2.1.3. Histórico.....	18
2.1.4. Descrição.....	19
2.2. TIPOS DE ESTAMPAGEM.....	20
2.2.1. Estampagem Simétrica.....	20
2.2.2. Estampagem Incremental Assimétrica.....	21
2.3. ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES ( <i>SPIF</i> ).....	22
2.4. PARÂMETROS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	24
2.4.1. Rotação da ferramenta.....	24
2.4.2. Raio da ferramenta.....	27
2.4.3. Material da ferramenta.....	28
2.4.4. Velocidade de avanço.....	30
2.4.5. Ângulo de parede.....	31
2.4.6. Espessura da chapa.....	33
2.4.7. Passo vertical.....	34
2.4.8. Lubrificação.....	36
2.4.9. Temperatura.....	36
2.5. MAQUINÁRIO.....	37
2.5.1. Máquinas específicas.....	37
2.5.2. Robôs industriais.....	38
2.5.3. Máquinas CNC.....	39
2.6. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO <i>SPIF</i> .....	40
2.7. RUGOSIDADE.....	42
2.7.1. Rugosidade média ( <i>Ra</i> ).....	42
2.7.2. Rugosidade de desvio médio quadrático ( <i>Rq</i> ).....	43
2.7.3. Rugosidade máxima ( <i>Rz</i> ).....	43
2.8. CARACTERIZAÇÃO DO ALUMÍNIO 1100.....	43
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	47
3.1. FERRAMENTA UTILIZADA.....	47
3.2. PRENSA CHAPAS.....	47
3.3. GEOMETRIA DE ESTAMPAGEM.....	48
3.4. LUBRIFICAÇÃO.....	50
3.5. CORPOS DE PROVA PARA ESTAMPAGEM ( <i>BLANKS</i> ).....	50
3.6. CENTRO DE USINAGEM.....	51
3.7. FLUXOGRAMA.....	54
3.8. PROCEDIMENTO PARA VERIFICAÇÃO DO ÂNGULO MÁXIMO DE PAREDE UTILIZANDO O ALUMÍNIO 1100.....	55
3.9. PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE DA GEOMETRIA ESTAMPADA.....	56
3.10. PLANEJAMENTO FATORIAL.....	58
<b>4. RESULTADOS</b> .....	60

4.1.	VERIFICAÇÃO DO ÂNGULO MÁXIMO DE PAREDE.....	60
4.2.	VERIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE DA GEOMETRIA.....	65
4.3.	PLANEJAMENTO FATORIAL.....	68
4.3.1.	<b>Efeito Principal</b> .....	78
4.3.2.	<b>Efeito de Interação</b> .....	80
4.3.2.1.	Regressão linear.....	82
5.	<b>CRONOGRAMA DE ATIVIDADES</b> .....	85
6.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	86
7.	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	88
8.	<b>ANEXOS</b> .....	92

## 1. INTRODUÇÃO

A globalização tem como principal consequência a difusão de diversos produtos e bens de consumo em todas as partes do mundo, isso, por sua vez, faz com que a demanda aumente, gerando então a necessidade de um aumento na capacidade de produção desses produtos de maneira rápida e com ótima qualidade. Dentro desse objetivo, a conformação mecânica tem um grande destaque na indústria que utiliza chapas metálicas, pois esse tipo de processo proporciona a obtenção de peças com ótimas propriedades mecânicas e pouco desperdício de matéria prima (SCHAEFFER, 1999).

Conformação mecânica pode ser entendida como um tipo de processo que modifica a forma de um corpo, em sua grande maioria metálico, para outra forma definida, a partir da aplicação de uma força externa que promova uma deformação no regime plástico do material, mas os valores de forças externas devem estar abaixo do valor limite de resistência de ruptura do material (BRESCIANI, 2011).

Dentro do conjunto de processos constituintes da conformação mecânica, existe a estampagem. A Estampagem é um processo que promove a conformação de uma chapa (*Blank*) para uma forma definida com dimensões específicas utilizando um punção e uma matriz (DALEFFE, 2008). Esse método é utilizado pela indústria por gerar peças com bom acabamento, boas dimensões e um baixo custo por peça fabricada e curto tempo de produção, porém essas vantagens são apenas para produções em grande escala de peças e de geometria mais simples, uma vez que o custo de obtenção de um sistema punção e matriz é elevado (TIBURI, 2007). Devido as vantagens a serem obtidas apenas para as produções em escala, o método de estampagem convencional não é benéfico para as produções de média ou pequena escala ou no desenvolvimento de protótipos. Diante dessa limitação, surge então uma alternativa que é a Estampagem Incremental de Chapas, ou ISF - *Incremental Sheet Forming*.

A Estampagem Incremental é um processo de conformação, patenteado por Leszak em 1967, que consiste em um método de conformação no qual o *Blank* é fixado junto a um molde, colocados em revolução, e conformado por uma ferramenta que aplica uma força suficiente para deformar plasticamente o material e estabelecer

uma forma sem a utilização de uma matriz (LESZAK,1967), processo muito similar ao de repuxo.

O método tem ganhado destaque por oferecer uma alta flexibilização quanto a forma de conformação e por ser de relativa facilidade de aplicação, uma vez que pode ser realizado em temperatura ambiente e requerendo um centro de usinagem CNC, uma ferramenta de ponta esférica ou semiesférica, e uma estrutura para suporte e fixação da chapa a ser conformada (FRITZEN *et. al*, 2011). Embora sua concepção seja simples, a estampagem incremental apresenta alguns parâmetros importantes a serem definidos, como: o tipo de fixação da chapa a ser conformada, a velocidade de avanço da ferramenta, a rotação da ferramenta, o incremento vertical, as dimensões e material da ferramenta, geometria a ser obtida e o tipo de lubrificante a ser utilizado.

O objetivo desse trabalho é avaliar o processo de estampagem incremental de ponto simples numa chapa de alumínio 1100 com espessura de 0,5 mm, variando o ângulo máximo de parede, e os fatores passo e avanço da ferramenta por meio de um planejamento fatorial.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

O trabalho tem como objetivo avaliar o processo de estampagem incremental de ponto simples em chapas de alumínio 1100.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Verificar a aplicabilidade do método de Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF);
- Avaliar o ângulo máximo de parede que a geometria a ser estampada em uma chapa de alumínio 1100 pode apresentar, sem rompimento do material;
- Avaliar, mediante rugosidade média (Ra) da peça conformada, a influência mais significativa entre os parâmetros 'Passo' e 'Avanço' da ferramenta por meio de um Planejamento Fatorial 2<sup>2</sup> resultando em uma superfície de resposta.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. ESTAMPAGEM INCREMENTAL**

#### **2.1.1. Estampagem**

Estampagem pode ser caracterizado como um conjunto de operações de manufatura de chapas metálicas, onde ocorrem, obrigatoriamente, alteração da forma geométrica produzindo cavidades, saliências, dobras, cunhas e furos. Essas deformações acontecem com o material de trabalho em estado sólido e o escoamento em regime plástico. Diferente da usinagem, a estampagem apresenta, como ponto de destaque, o maior aproveitamento do material sem a geração de sobras, conferindo uma maior vantagem para esse método (CASTELAN, 2007; MARTINS, 2005).

#### **2.1.2. Estampagem Incremental**

Estampagem Incremental de Chapas (ISF) pode ser caracterizada como um processo de conformação que é realizado progressivamente, capaz de produzir peças de geometrias complexas, a partir de uma chapa, sem a necessidade de utilização de um sistema de punção e matriz (ferramentas dedicadas), executada utilizando ferramentas simples e com o uso da tecnologia CNC, sendo essa específica para essa aplicação ou adaptada. É um processo que tem gerado bastante interesse devido sua flexibilidade e simplicidade, que tem sido comumente utilizado na confecção de produtos em pequenas escalas e na prototipagem, principalmente na indústria automotiva, aeronáutica, naval e com grande contribuição para aplicações médicas na confecção de alguns tipos de próteses. A aplicação médica tem sido a mais beneficiada, pois torna-se inviável confeccionar próteses a partir de matrizes, uma vez que cada ser humano necessita de um modelo específico.

#### **2.1.3. Histórico**

A estampagem realizada de forma incremental, por pequenas variações consecutivas, foi patenteada por Leszak em 1967 (LESZAK, 1967), mas apenas nos anos 90 que sua viabilidade tecnológica pode ser apresentada no Japão onde Kitazawa, Iseki e Matsubara fabricaram, em alumínio, uma peça simétrica por revolução (torneamento). A viabilidade da realização da estampagem incremental utilizando a tecnologia CNC, foi apresentada por (HIRT *et. al*, 2003) no seu trabalho 'Estratégias de conformação e modelagem de processos CNC para conformação

incremental de chapas' no ano de 2003. Outros pesquisadores como J. Allwood e J.R. Duflou também se dedicaram à essa linha de pesquisa. A Fig. (1) mostra um esquemático para o modelo a ser implementado junto a tecnologia CNC.

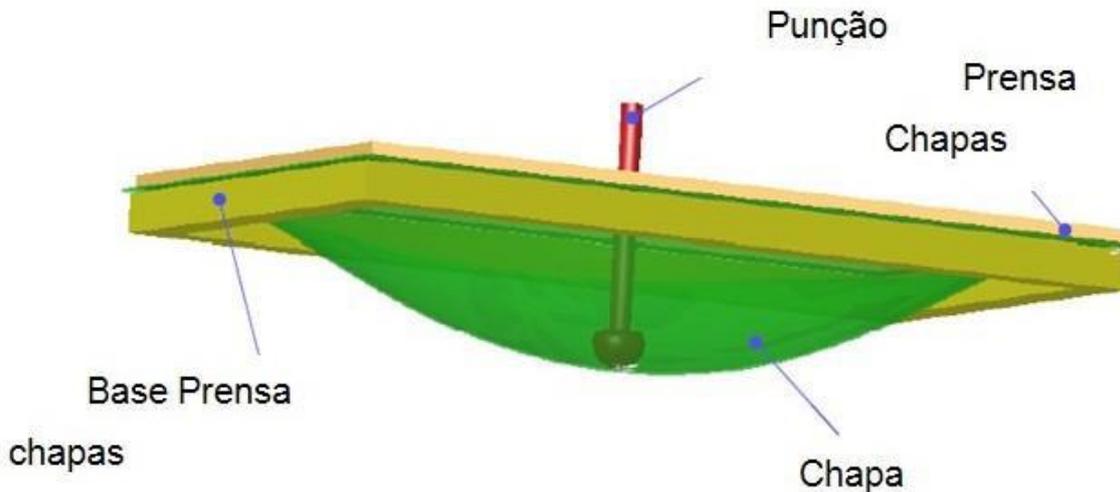


Figura 1 – Modelo de processo de estampagem incremental de ponto simples.

Fonte: (STRANO,2003).

#### 2.1.4. Descrição

O processo de estampagem incremental pode ser descrito da seguinte forma: Uma chapa metálica quadrada ou retangular (*Blank*) de espessura variando de 0,5 até 1,5 mm, é fixada em um suporte (prensa chapas) que por sua vez é fixado na mesa de uma máquina de usinagem CNC.

No eixo de árvore da máquina, é fixada a ferramenta simples de ponta esférica ou semiesférica, que irá promover deformações locais na chapa por meio da aplicação de força de compressão sob o material resultante da movimentação no eixo Z, podendo a ferramenta ainda ser rotacionada ou não.

O processo de conformação é gradativo, múltiplos passes, e a movimentação nos três eixos, X, Y e Z promovidos pela CNC geram uma movimentação tridimensional, que possibilita a reprodução de uma geometria criada em CAD e transmitida para a CNC por um código de programação (código G) que define o caminho que a ferramenta percorrerá. A Fig. (2) representa a montagem do sistema em uma máquina de usinagem do tipo CNC.



Figura 2 – Execução do processo de estampagem incremental de ponto simples.

Fonte: (SENA, 2009).

## 2.2. TIPOS DE ESTAMPAGEM

### 2.2.1. Estampagem Simétrica

No processo de estampagem incremental simétrica, a chapa é fixada junto a um mandril que rotaciona junto à chapa. Esse mandril possui a forma interna da peça final, e uma ferramenta, em forma de disco, aplica incrementos externos consecutivos de forma a moldar a chapa ao perfil do mandril. Essa ferramenta de conformação pode ou não estar em contato contínuo com a chapa que será conformada (SENA, 2009; KUNERT, 2005). Esse tipo de processo é ilustrado na Fig. (3) a seguir.

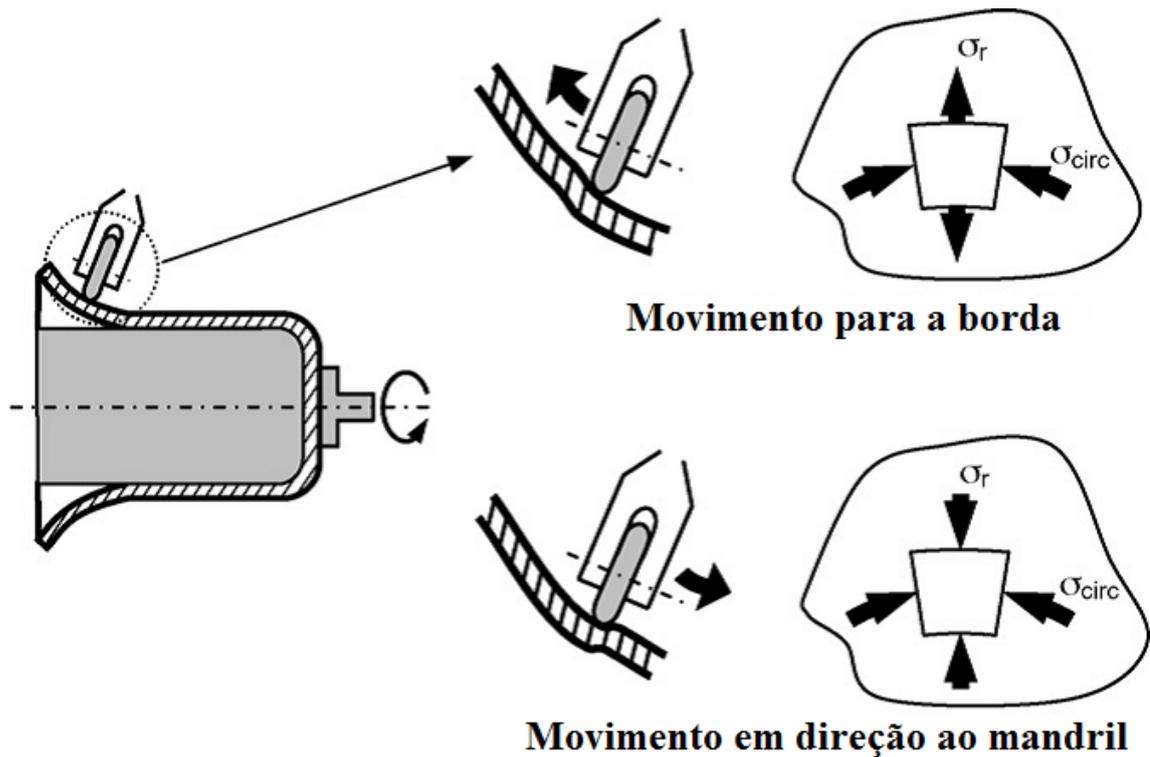


Figura 3 - Estampagem incremental simétrica conforme à patente.

Fonte: (SILVA, 2009).

### 2.2.2. Estampagem Incremental Assimétrica

A estampagem incremental do tipo assimétrica é a que tem ganhado destaque no âmbito de P&D, pois é o método que permite maior flexibilidade de concepção, podendo ser realizado com máquinas com tecnologia dedicada ou com tecnologia CNC com três eixos adaptados, sendo esse ponto a principal motivação para novos estudos quanto a esse processo. Esse tipo de estampagem tem como diferencial alguns pontos com relação ao simétrico e aos processos tradicionais (punção e matriz) já conhecidos:

- Ferramentas simples e de pequenas dimensões;
- Ausência ou presença de uma matriz dedicada;
- Contato contínuo da ferramenta com a chapa;
- Movimento tridimensional controlado da ferramenta.

Devido a essas características, a estampagem assimétrica pode ainda ser subdividida em quatro tipos no que se refere ao número de pontos de apoio: Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF - “*Single Point Incremental Forming*”), Estampagem Incremental de Ponto Duplo (TPIF - “*Two Point Incremental Forming*”), Estampagem Incremental com Apoio Inferior Negativo e Estampagem Incremental com Apoio Inferior Positivo. A Fig. (4) ilustra os quatro tipos citados anteriormente (SENA, 2009; KUNERT, 2005).

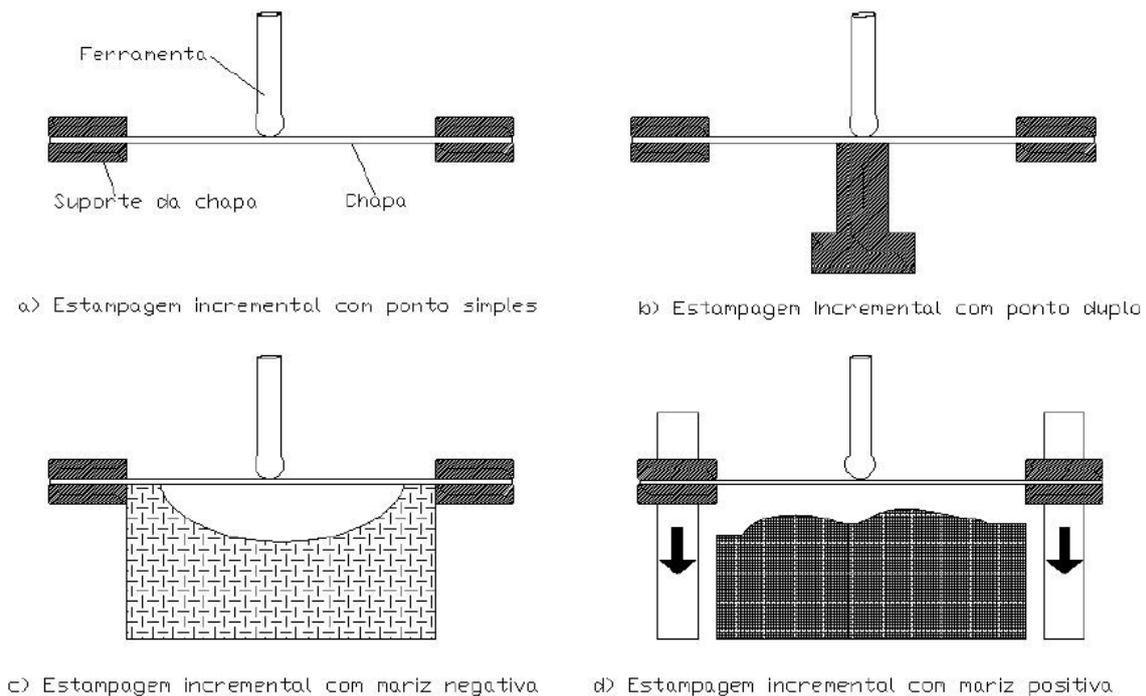


Figura 4 - Tipos de estampagem incremental assimétrica.

Fonte: (ALWOOD et.al,2005)

### 2.3. ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES (SPIF)

O processo de estampagem incremental de ponto simples ou ponto único, foi impulsionada por diversos pesquisadores, como Jeswiet, Leach e Fratini, que demonstraram que o método de estampagem poderia ser realizado utilizando um centro de usinagem CNC com três eixos, com ferramentas simplificadas e utilizando softwares CAD/CAM de modo a estabelecer o caminho o qual a ferramenta iria percorrer, possibilitando a reprodução da geometria complexa gerada via CAD (SENA, 2009).

Primeiramente, a chapa (*Blank*) é fixada (para que não se movimente durante a conformação) em um suporte móvel, que por sua vez, é fixado na mesa do centro de usinagem CNC. No eixo árvore da máquina, é fixada a ferramenta cilíndrica de ponta semiesférica ou esférica. A movimentação nos eixos X e Y são promovidas pela mesa da CNC, enquanto a movimentação em Z é promovida pelo eixo árvore, empurrando a ferramenta para dentro da chapa gerando uma deformação local. Essa movimentação em Z ocorre de maneira gradativa (incremental) e de maneira consecutiva (passos) em um caminho definido para geração da geometria (CAVALER, 2010; SILVA, 2017). A Fig. (5) ilustra o modelo de SPIF.

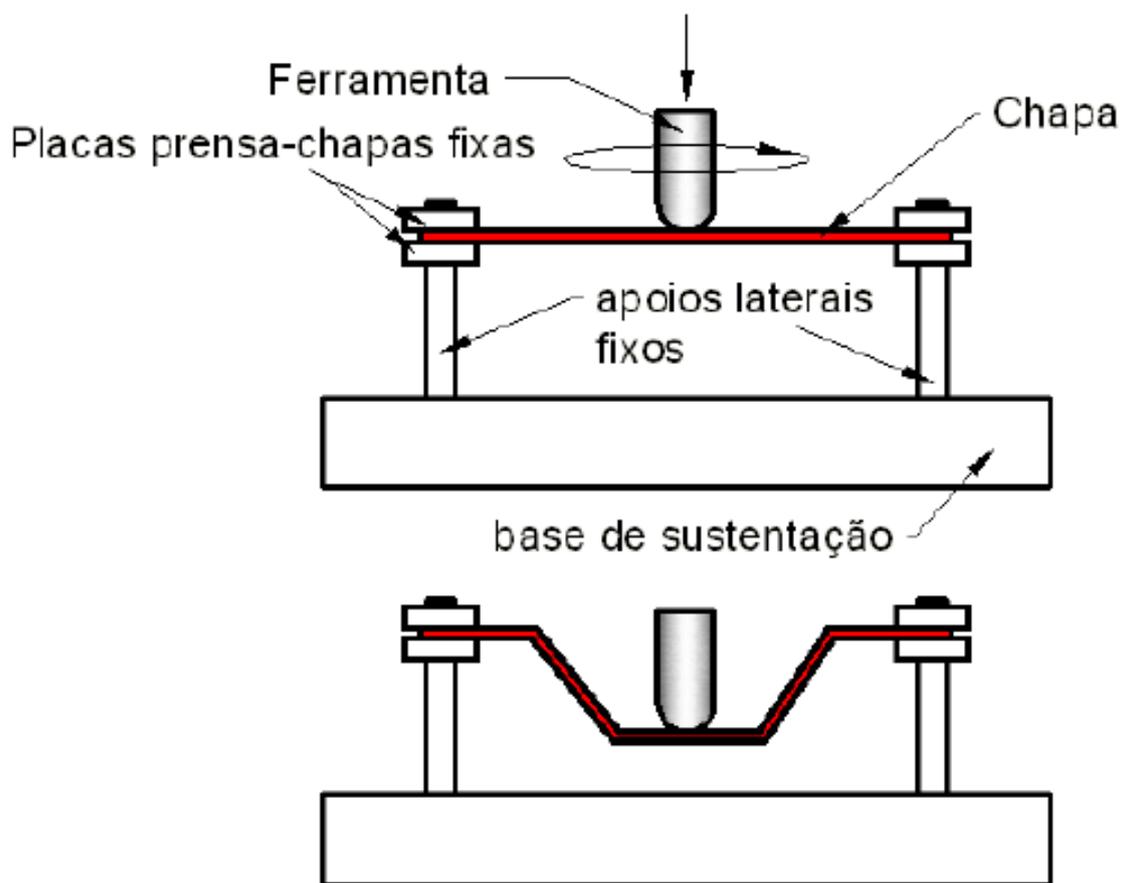


Figura 5 – Esquema de estampagem incremental de ponto simples (SPIF).

Fonte: (CASTELAN, 2010).

Esse tipo de estampagem é chamado de ponto simples ou único, pelo fato de a chapa estar fixada e apoiada apenas em suas extremidades e sua área de deformação ser livre, onde o único contato para conformação é entre a ferramenta e

a chapa (CASTELAN, 2007). Este tipo de estampagem será considerado nesta pesquisa.

## 2.4. PARÂMETROS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

O processo de estampagem incremental possui uma quantidade expressiva de parâmetros que influenciam significativamente no processo, dentre eles, podem ser considerados:

- Velocidade de avanço da ferramenta ( $V_{fh}$ );
- Profundidade do passo vertical ( $z$ );
- Rotação ( $w$ ); Material; Tipo e Tamanho de ferramenta;
- Material e Espessura da chapa;
- Lubrificação;
- Estratégia de conformação (caminho da ferramenta);
- Tipo de estampagem (SPIF ou TPIF);
- Ângulo de parede da geometria ( $\alpha$ );
- Temperatura;

A seguir, será feita uma abordagem sobre os parâmetros apresentados anteriormente.

### 2.4.1. Rotação da ferramenta

No SPIF são consideradas duas situações quanto a movimentação angular da ferramenta (CAVALER, 2010);

- Ferramenta livre: onde não é imposta uma rotação pelo eixo árvore da máquina;
- Ferramenta movida: onde é imposta uma rotação pelo eixo árvore da máquina na ferramenta.

Entre os pesquisadores da estampagem incremental, existem diferentes ponderações quanto a rotação da ferramenta. Alguns afirmam que a velocidade de rotação gera aquecimento local, tanto na chapa quanto na ferramenta, que contribui para conformação do material, assim como também há autores que realizaram testes com a ferramenta livre e concluíram que não há interferência significativa da mesma. As operações com a ferramenta parada não são muito utilizadas, pois podem gerar grandes esforços no eixo árvore da máquina CNC, algumas máquinas permitem a rotação livre da ferramenta, outras necessitam de uma adaptação de um rolamento no mancal de fixação. Mesmo com a movimentação livre da ferramenta, ocorre o aquecimento da ferramenta e da chapa proveniente do atrito entre elas, necessitando da utilização de um fluido lubrificante para preservar as características do material e reduzir o desgaste da ferramenta (FURLANETTI, 2014).

O método de rotação livre é mais utilizado em máquinas dedicadas para estampagem incremental por já terem o suporte-ferramenta voltado para isso e apresenta uma boa conformação da peça.

Para o SPIF realizado em CNC, é mais utilizado o método com rotação de ferramenta, pois a rotação gera o atrito, que por sua vez gera aquecimento localizado, torna o material, nesse local, mais maleável e, como resultado, melhora a conformação do material. As rotações variam normalmente de 0 a 7000 rpm.

O aquecimento proveniente da rotação da ferramenta pode ser devido ao 'efeito do atrito' ou 'efeito térmico'. O 'efeito do atrito' ocorre em baixas rotações de ferramenta (0 a 1000 rpm), e é o mais significativo na conformação. A conformação do material tende a melhorar com a redução do atrito para a faixa de rotação de 0 a 500 rpm. O 'efeito térmico' ocorre para altas rotações (2000 a 7000 rpm) onde se observa maior ductilidade do material. Acima dos 3000 rpm, a temperatura alcançada, dependendo dos materiais da chapa e ferramenta, pode dar origem a recristalização dinâmica do material da peça, onde a microestrutura do material naquele local pode ser modificada e alterar as propriedades do material naquele ponto (SILVA, 2017).

Em seu trabalho, DURANTE *et al.* (2009), fez uma avaliação da variação da temperatura no material de acordo com a variação da velocidade de rotação e o sentido de rotação, os resultados podem ser apreciados na Fig. (6) a seguir.

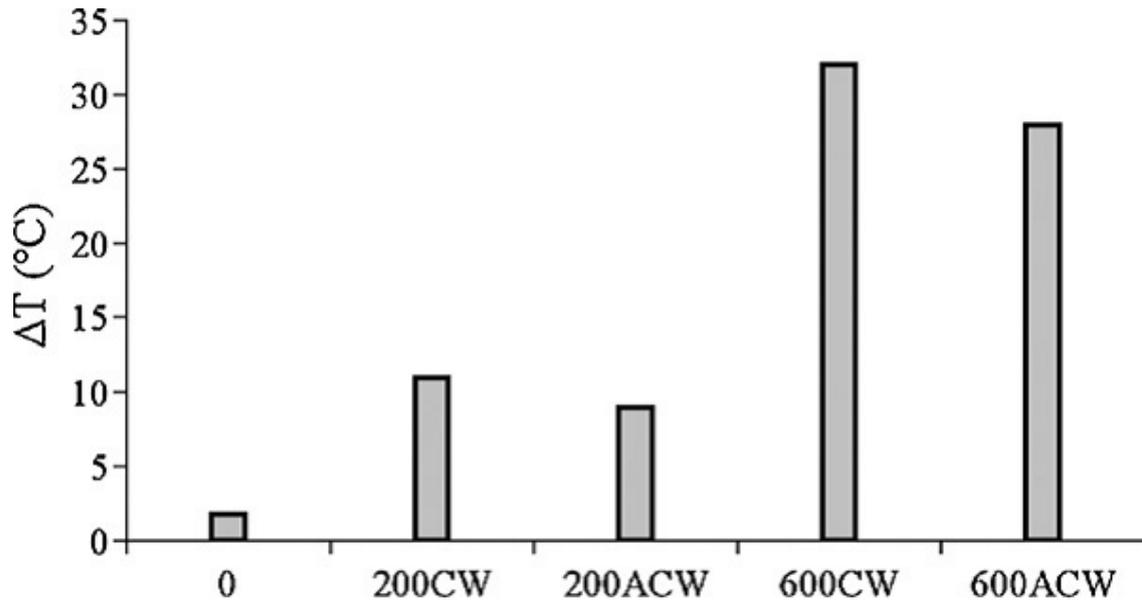


Figura 6 - Variação da temperatura em função da rotação da ferramenta (CW – sentido horário) e (ACW – sentido anti-horário).

Fonte:(DURANTE *et al.*, 2009 adaptado).

Conforme a Fig. (6), pode-se notar que a temperatura é diretamente proporcional a velocidade de rotação da ferramenta, porém isso é válido se a velocidade de avanço for mantida como um parâmetro constante. Quando a ferramenta está com movimentação livre, a temperatura tende a diminuir pois o atrito da mesma com a chapa é menor, portanto, controlar a rotação da ferramenta, resulta no controle da temperatura do material e, conseqüentemente, a conformação do material, porém o aumento da rotação impacta no maior desgaste da ferramenta e das propriedades dos lubrificantes utilizados (SENA, 2009).

#### 2.4.1.1. Rotação

A intensidade da rotação da ferramenta, é um dos parâmetros de relevante influência na estampagem incremental, portanto, deve ser determinado um valor adequado para a mesma.

A Eq. (1) é utilizada para definição da velocidade angular (CAVALER, 2010):

$$w = \frac{vfh}{\pi RT \sqrt{\frac{1}{2}(1-2+\cos 2\alpha)}} \quad (1)$$

Onde:

$w$  = velocidade de rotação (rpm);

$V_{fh}$  = Velocidade de avanço (mm/min);

$R_T$  = Raio de ferramenta (mm);

$\alpha$  = Ângulo de parede (°).

A Fig. (7) indica os parâmetros utilizados na equação anterior.

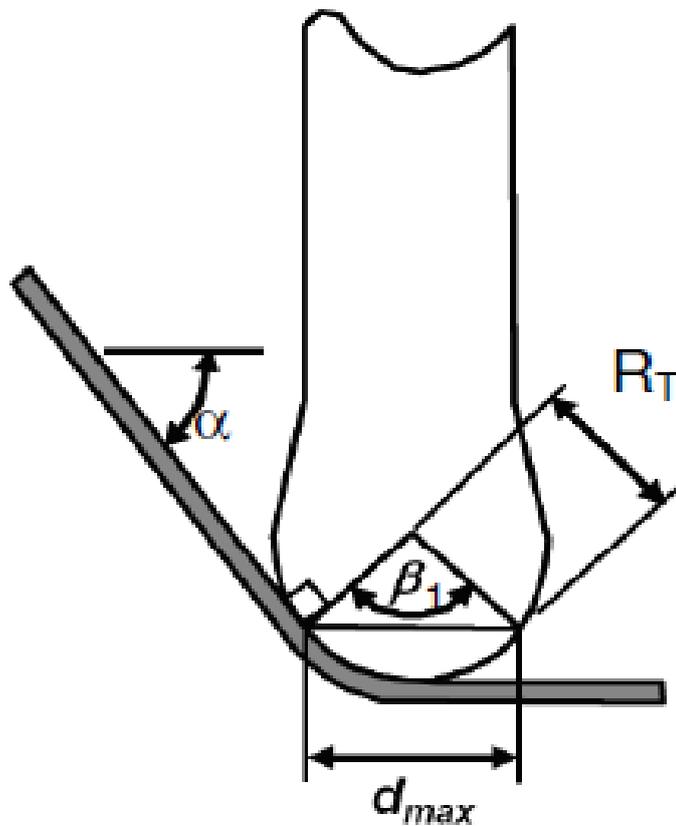


Figura 7 - Parâmetros da ferramenta para cálculo da velocidade angular (Avanço).

Fonte: (CASTELAN, 2007).

#### 2.4.2. Raio da ferramenta

O raio da ferramenta também é um fator significativo na estampagem incremental. Além de ser influente na velocidade de rotação, também é preponderante na qualidade superficial, profundidade de conformação e tempo de manufatura.

O raio da ferramenta deve ser definido de acordo com a geometria a ser obtida, sendo ele menor ou igual ao menor raio presente na peça a ser estampada. Os raios das ferramentas mais utilizados costumam variar de 4 a 15 mm, mas podem chegar até 100 mm para estampagem de peças maiores em máquinas dedicadas (SENA, 2009).

No que diz respeito à conformação de chapas no SPIF, o raio da ferramenta pode promover alterações de acordo com seu aumento ou redução, essas relações podem ser vistas na Tab. (1) abaixo.

Tabela 1 - Influência do raio da ferramenta em alguns parâmetros de conformação.

Parâmetros	Raio maior	Raio menor
Força de conformação (da máquina)	Aumenta	Diminui
Conformação (flexibilidade da geometria)	Diminui	Aumenta
Tempo	Diminui	Aumenta
Tensões locais	Diminui	Aumenta
Área de contato	Aumenta	Diminui
Vida de ferramenta	Aumenta	Diminui

Fonte: (DALEFFE, 2007; SENA, 2009; CAVALER, 2010; CASTELAN, 2010; FURLANETTI, 2014; SILVA, 2017).

#### **2.4.3. Material da ferramenta**

Assim como o raio e a intensidade de rotação da ferramenta, seu material também é atuante na conformação da chapa.

Normalmente, as ferramentas para estampagem incremental são fabricadas em Aço-ferramentas, ou Metais Duros, materiais comumente utilizados em ferramentas de usinagem. Esses materiais são comumente empregados por apresentarem boas propriedades tribológicas além de melhores características

(dureza, rugosidade, tenacidade...) em relação aos materiais que são normalmente conformados (SILVA, 2017; FURLANETTI, 2014).

Para obter melhores propriedades, essas ferramentas ainda podem passar por um processo de revestimento de sua superfície, onde outro material é depositado e agregado à ferramenta. O revestimento pode trazer como melhorias; aumento da resistência ao desgaste, redução do coeficiente de atrito, aumento de resistência a compressão e fadiga, e aumento de vida útil da ferramenta, além de melhora no acabamento superficial da peça. Os revestimentos mais utilizados são Nitreto de Titânio (TiN), Nitreto de Cromo (CrN) e o Carbonitreto de Titânio (TiCN) (CAVALER, 2010).

A Tab. (2) apresenta as propriedades de acordo com o tipo de material de revestimento mais utilizados.

Tabela 2 - Propriedades dos materiais de revestimento.

Camada	TiN	CrN	TiCN
Dureza [HV 1N]	2500	2300	2900
Carga crítica [N]	60	45	50
Temperatura de Oxidação [°C]	550	650	450
Coeficiente de atrito	0,55	0,55	0,50
Ductibilidade relativa <sup>2</sup> [%]	1,09	0,2-0,3	-
Espessura [µm]	4	20	4
Rugosidade (Ra) [µm]	0,20	0,18	0,20

Fonte: (CAVALER,2010)

A Fig. (8) apresenta modelos de ferramentas de estampagem incremental.



Figura 8 - Modelos de ferramentas para ISPF.

Fonte: (SENA,2009).

#### **2.4.4. Velocidade de avanço**

Velocidade de avanço, avanço de máquina ou avanço de mesa, representa a velocidade de movimentação da ferramenta com relação a peça conformada e sua unidade é em mm/min. Esse parâmetro é o de maior influência no tempo de manufatura e também é preponderante no que tange ao acabamento superficial da peça. O aumento dessa velocidade, diminui a conformabilidade do material. Em estudos realizados, percebeu-se maior perda de conformação para valores superiores à 2500 mm/min (SILVA, 2017).

Associado a perda de conformação, surge outro problema, que é o erro de profundidade de estampagem, o retorno elástico, que tende a ser maior com o aumento da velocidade de avanço. Nas literaturas, os valores comumente utilizados para velocidades de avanço variam de 500 a 1500 mm/min, já buscando minimizar os efeitos do retorno elástico (CASTELAN, 2010).

A velocidade de avanço também está correlacionada com a temperatura durante a manufatura, sendo uma inversamente proporcional a outra, por isso o controle desse parâmetro é levado em consideração no processo de estampagem incremental.

### 2.4.5. Ângulo de parede

O ângulo máximo de parede é o maior valor possível de ser implementado na geometria da peça, sem que haja a falha do material (FURLANETTI, 2014). Esse valor é limitado pela geometria a ser obtida, espessura da chapa e pela ferramenta de conformação (CAVALER, 2010). Pode ser entendido como o ângulo formado entre o plano inicial da chapa em relação ao novo plano da chapa para formar a geometria a ser estampada.

O ângulo de parede é o fator limitador mais importante na estampagem incremental, já que está diretamente ligado a variação da espessura da chapa (CASTELAN, 2010; SILVA, 2017).

Estudos apontam que, para o ISPF, o valor de ângulo máximo de parede é de aproximadamente 65°(graus), a partir desse valor, o risco de falha ou redução extrema da espessura da chapa, aumentam consideravelmente. No trabalho de MINUTOLO *et al.* (2007) foram realizados testes de estampagem utilizando uma geometria de tronco de pirâmide e tronco de cone, onde os ângulos variaram de 45° a 60° e 50° a 65°, respectivamente. Os ângulos de fratura observados foram 65° e 70°, respectivamente, e testes complementares foram realizados acrescentando 1° a partir de 60° para o tronco de pirâmide e 65° para o tronco de cone. Os resultados obtidos mostraram que o ângulo máximo de parede para as duas geometrias submetidas as mesmas rotinas de teste foram de 63° para o tronco de pirâmide e 66° para o tronco de cone (CASTELAN, 2010).

O valor de ângulo máximo pode ser obtido a partir da lei do seno, mostrada na Eq. (2).

$$t1 = t0 * \sin(90^\circ - \alpha) \quad (2)$$

Onde:

t1= espessura final (mm);

t0= espessura inicial (mm);

$\alpha$  = ângulo de parede (°).

A Fig. (9) exemplifica a relação entre o ângulo de parede e a espessura da chapa.

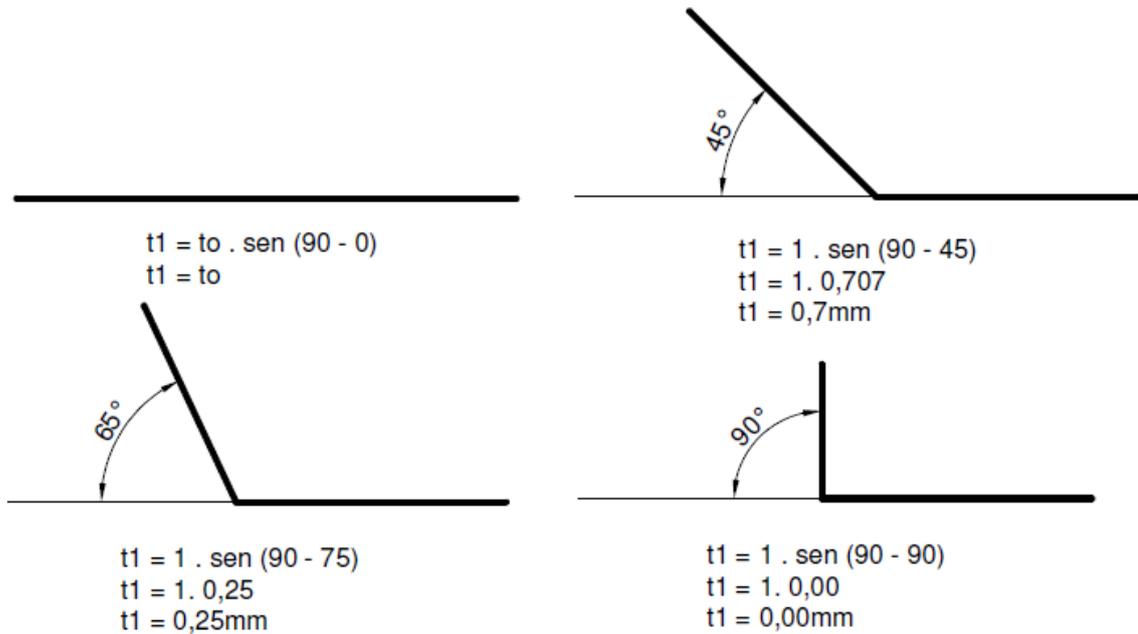


Figura 9 - Exemplos da relação entre espessura e ângulo de parede no SPIF.

Fonte: (CASTELAN, 2007).

Essa representação somente é possível em virtude de a espessura da chapa obedecer a lei do volume constante (SENA, 2009).

Devido às limitações, novos processos com múltiplos estágios foram desenvolvidos para superar esses valores de ângulos citados anteriormente, como limites, onde variando a inclinação da parede ao longo da profundidade, obtém-se uma maior capacidade de estampagem (CASTELAN, 2007). A Fig. (10) ilustra o modelo de variação do ângulo com a profundidade.

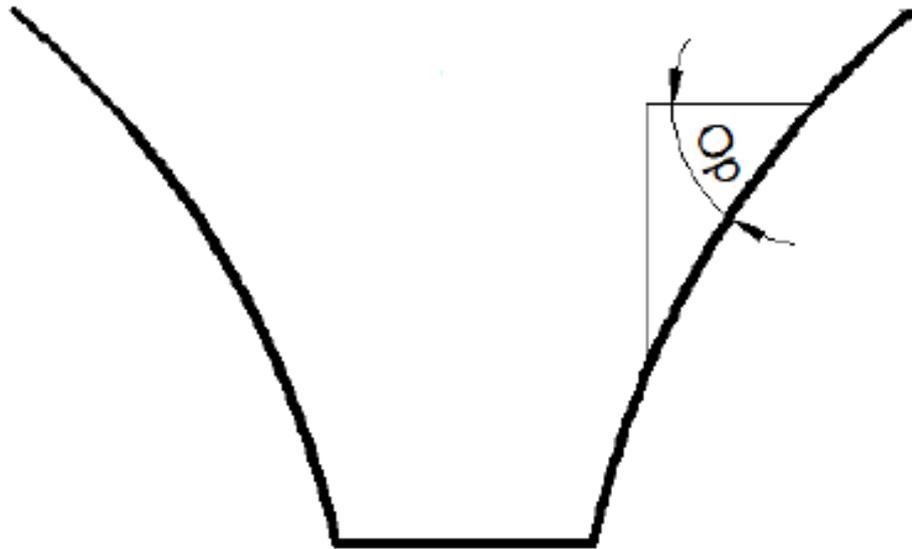


Figura 10 - Ilustração do processo com variação da angulação com a profundidade.

Fonte: (CASTELAN,2007 adaptada).

#### 2.4.6. Espessura da chapa

A espessura da chapa é limitada pela capacidade da máquina utilizada no processo. Quanto maior a espessura da chapa, maior o ângulo de parede que pode ser empregado e maior a conformabilidade, porém, a força de contato entre a ferramenta e a chapa aumenta, e por consequência, a força no eixo árvore sofre aumento também, algo que pode ser prejudicial em máquinas adaptadas ao processo, como no caso de centros de usinagem CNC (SENA,2009).

O uso de chapas de espessuras maiores, valores superiores a 1,5 mm, aumenta significativamente a pressão e a penetração da ferramenta na chapa, ao ponto de ser energeticamente mais favorável deformar e remover o material da chapa em forma de cavacos. O uso de chapas de sacrifício resolve esse problema de retirada de material (SKJØDT, 2008).

Os valores de espessura comumente usados variam de 0,5 a 3 mm para o alumínio, no que tange a pesquisas, e 0,5 a 5 mm comercialmente. Para aços inoxidáveis, os valores de espessura para pesquisas variam de 0,5 a 1 mm e comercialmente, de 0,5 a 2 mm de espessura (DALEFFE, 2008).

### 2.4.7. Passo vertical

Outro parâmetro de grande influência é o passo vertical, que é a distância entre cada passo realizado pela ferramenta, na direção Z da máquina CNC, na execução do caminho pré-estabelecido. Pode ser estabelecida uma razão entre o valor do diâmetro da ferramenta com o valor do incremento vertical. Caso essa razão seja igual ou superior a 40, a ocorrência de retirada de material da chapa pela ferramenta, se torna presente (CASTELAN, 2010). A Fig. (11) mostra a relação entre passo, raio de ferramenta e ângulo de parede com a rugosidade.

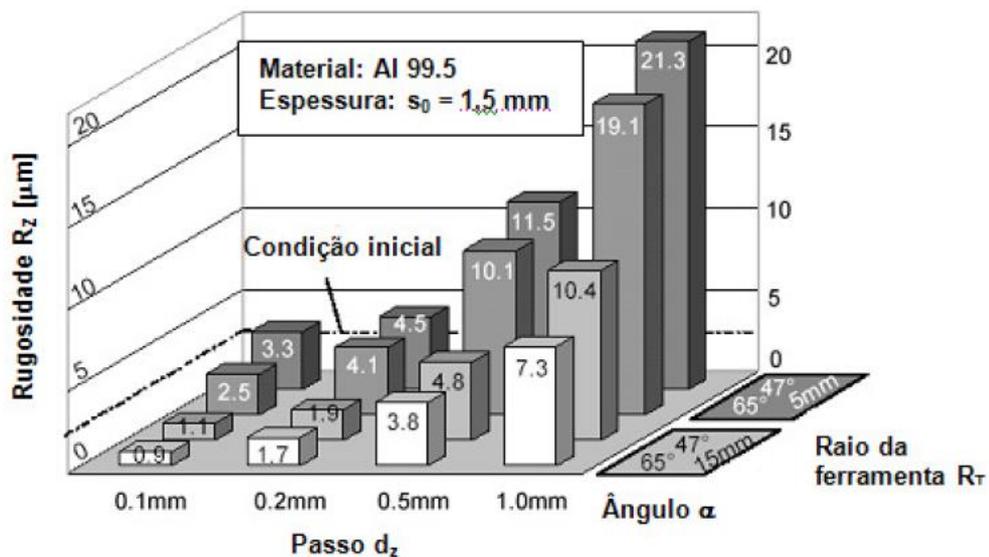


Figura 11 - Rugosidade em função do passo, raio de ferramenta e ângulo de parede.

Fonte: (JUNK et al.,2003).

A Fig. (11) mostra que com o aumento do passo vertical, sem alteração do raio da ferramenta e do ângulo de parede, a rugosidade superficial do material aumenta, e esse aumento é mais atenuado quando a raio da ferramenta é menor.

O passo vertical também está relacionado com a força exercida sob o eixo árvore da máquina CNC, onde o aumento do incremento, gera um aumento de força. O uso de passos menores, além de reduzir a força no eixo árvore, gera produtos de maior qualidade pois a conformabilidade é melhor, porém o tempo de fabricação torna-se maior (SILVA, 2017).

Um ponto muito importante com relação a esse parâmetro, é com relação a aplicação de um valor constante para execução do caminho da ferramenta. A utilização de valores constantes em geometrias em formatos de arcos, geram pontos de concentração de material, chamados de *Scallops*, que ocasionam um aumento de rugosidade e redução da qualidade da peça. A Fig. (12) ilustra como ocorre essa formação.

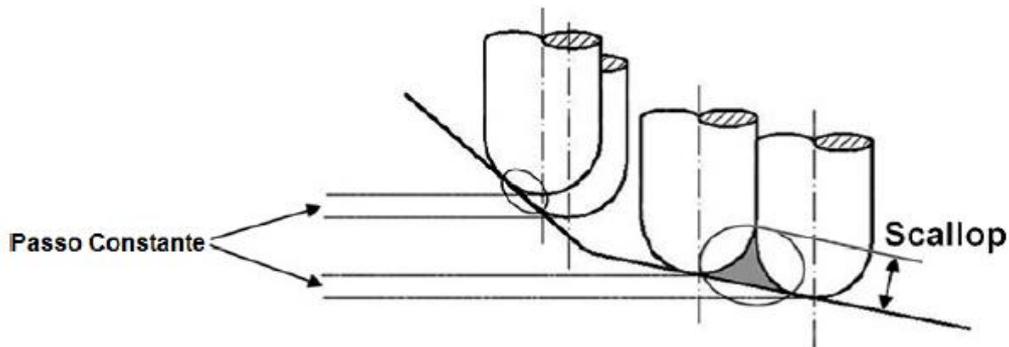


Figura 12 - Formação do *Scallop*.

Fonte: (ATTANASIO *et al.*,2008).

A solução para não haver a formação do *Scallop* é a utilização do passo variável, '*Constant Cusp Finishing*', onde ocorre o controle do valor do passe vertical de modo a compensar a inclinação da geometria e manter a regularidade da rugosidade da peça (CASTELAN, 2010). A Fig. (13) ilustra os dois tipos de passes, o constante e o variável.

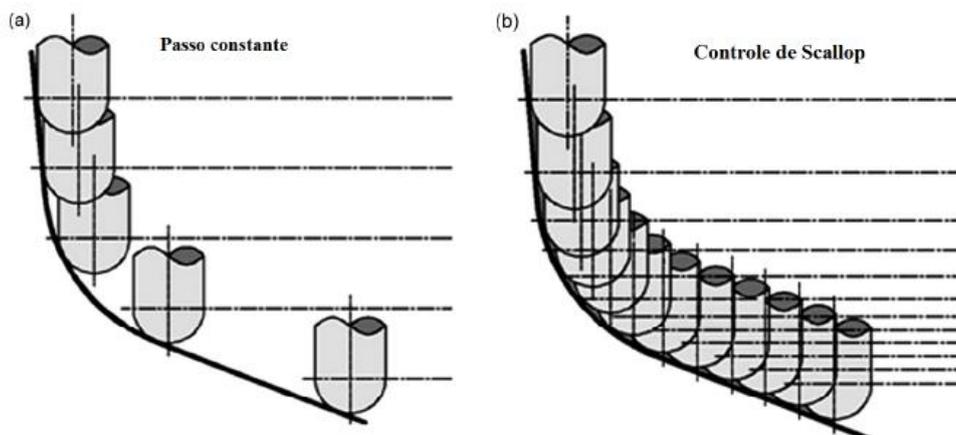


Figura 13 - a) Incremento vertical com passe constante. b) Incremento vertical com passe variável.

Fonte: (ATTANASIO *et al.*,2008).

Junto ao avanço em Z, a trajetória da ferramenta deve ser, preferencialmente, helicoidal de modo a reduzir o aparecimento de irregularidades na superfície (FURLANETTI, 2014).

#### **2.4.8. Lubrificação**

A Lubrificação é importante na maioria dos processos de estampagem, e é um ponto muito importante na estampagem incremental. Seu uso no processo tem alguns objetivos como (DALEFFE, 2008; SILVA, 2017):

- Redução do atrito entre ferramenta e chapa;
- Redução de temperatura;
- Redução do desgaste da ferramenta;
- Melhora no acabamento da superfície da chapa;
- Redução na força de trabalho da ferramenta.

A quantidade a ser utilizada depende da espessura e tipo do material da chapa a ser estampada, e o uso do lubrificante é recomendável para a manutenção das propriedades tribológicas do material além de reduzir as alterações que possam ser provocadas na temperatura, rugosidade e desgaste da chapa e da ferramenta (DALEFFE, 2008; SENA, 2009; SILVA, 2017).

#### **2.4.9. Temperatura**

A Temperatura se faz atuante no SPIF, uma vez que o contato constante entre a ferramenta de conformação e a chapa gera atrito, que por consequência, gera calor. O aumento de temperatura do material auxilia em sua conformação, uma vez que o material se torna mais maleável, o que levou ao desenvolvimento de equipamentos que promovem o aquecimento da chapa durante o processo de conformação.

Promovendo o controle da temperatura do material, é possível obter peças com uma estrutura com menores tensões residuais, processos mais estáveis, resultados mais próximos aos modelos CAD e menores tempos de conformação, e como consequência, menores custos de produção (SILVA, 2017).

## 2.5. MAQUINÁRIO

A estrutura necessária para realização do SPIF é muito semelhante à de usinagem CNC, utilizando o CAD na geração da geometria e o CAM na comunicação com a máquina, variando apenas a ferramenta utilizada e o dispositivo de fixação da chapa, o que permite facilmente a utilização de centros de usinagem CNC com poucas adaptações. Além das máquinas CNC, podem ser utilizados robôs industriais, também adaptados, ou máquinas dedicadas à estampagem incremental (SILVA, 2017). O maquinário a ser utilizado irá depender da disponibilidade, tamanho da peça, forma construtiva da máquina e capacidade de comando, assim como outros fatores (CAVALER, 2010).

### 2.5.1. Máquinas específicas

Tais máquinas possuem as seguintes características:

- São máquinas construídas para esse tipo de processo;
- Capazes de medir e controlar a força da ferramenta nos três eixos;
- Possuem controle de rotação de ferramenta, possibilitando execução de peças com rotação livre ou não;
- Custo elevado de aquisição.

A Fig. (14) apresenta um modelo de máquina específica para o SPIF.

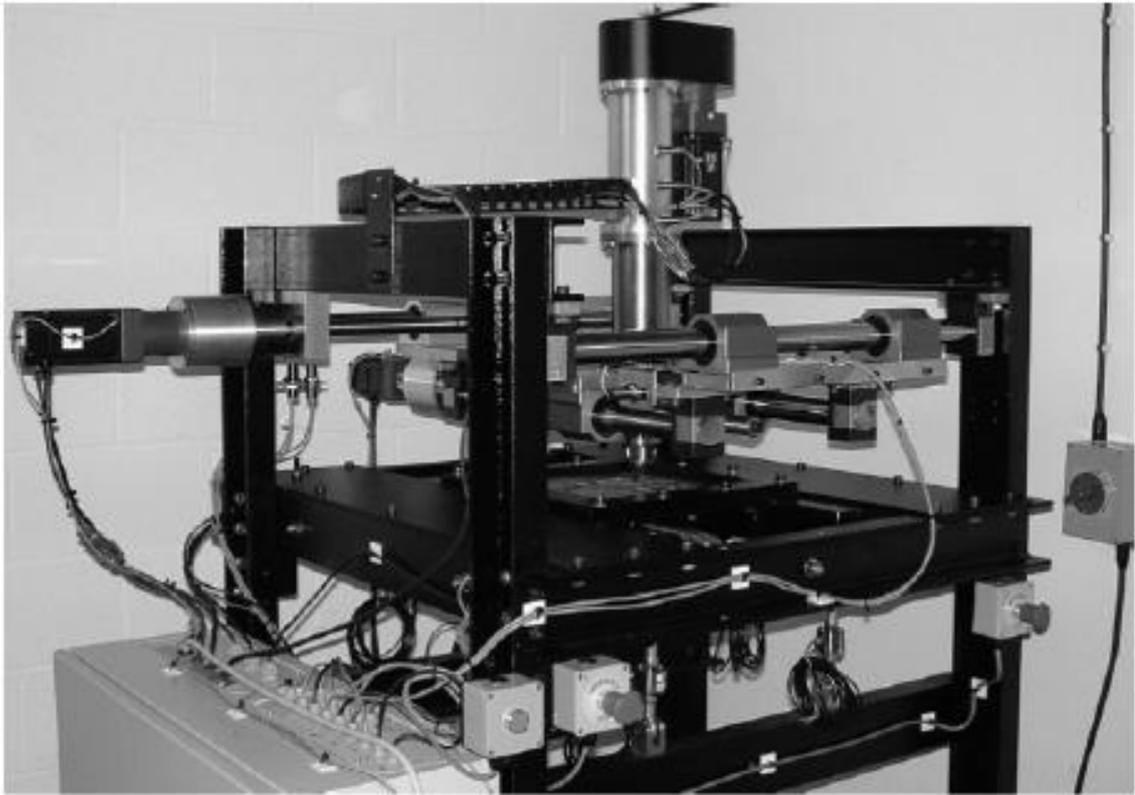


Figura 14 - Máquina dedicada ao SPIF.

Fonte: (ALLWOOD, 2005).

### **2.5.2. Robôs industriais**

Tais robôs possuem as seguintes características:

- Necessitam de pouca adaptação para o processo;
- Possuem maiores flexibilidades quanto a movimentações;
- Podem trabalhar de maneira simultânea em uma única peça;
- Um robô pode realizar mais de uma etapa do processo de fabricação;
- Custo mais atrativo devido maior flexibilidade de utilização.

A Fig. (15) representa um robô adaptado ao processo.

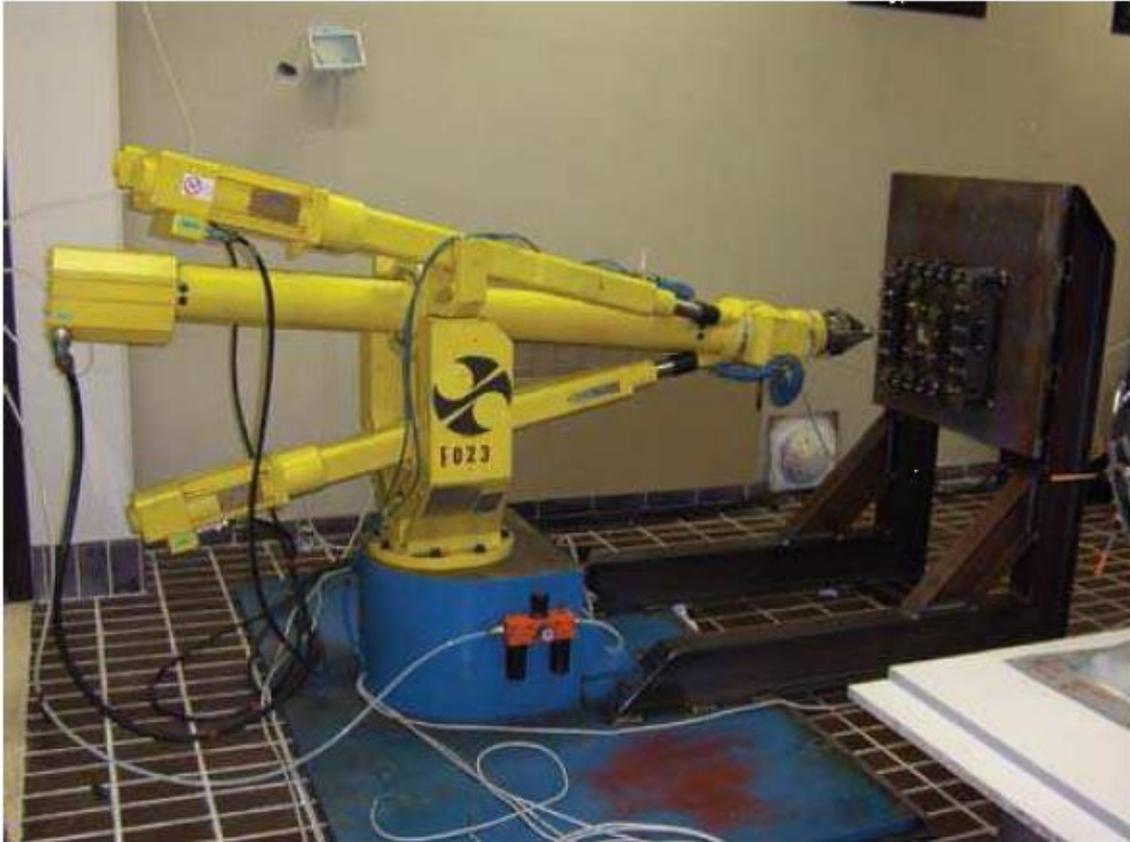


Figura 15 - Robô realizando o SPIF.

Fonte: (SILVA,2017).

### 2.5.3. Máquinas CNC

Tais máquinas CNC possuem as seguintes características:

- Baixo custo inicial para operações (poucas adaptações);
- Bons rendimentos no processo;
- Alta versatilidade (produzem uma grande variedade de peças);
- Alta capacidade de trabalho;
- Limitada pelo tamanho da mesa de usinagem;
- Não é capaz de medir força nos três eixos.

A Fig. (16) apresenta um modelo de centro de usinagem CNC.



Figura 16 - Modelo de máquina CNC.

Fonte: (SILVA,2017).

## 2.6. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO SPIF

A estampagem incremental tem como objetivo atender as necessidades das empresas que buscam processos inovadores e eficientes, capazes de confeccionar produtos de geometrias simples e/ou complexas, com baixo tempo e custo de desenvolvimento e flexíveis às variações em curtos espaços de tempo (DALEFFE, 2008; FURLANETTI, 2014).

Como os demais processos de conformação, ele apresenta como vantagens (CASTELAN, 2010; CAVALER, 2010; DALEFFE, 2008; FURLANETTI, 2014):

- Baixo custo e tempo de preparação de máquina;

- Dispensa do uso de ferramentas dedicadas e de alto custo (punção e matriz);
- Produção flexível. Alterações no projeto da peça podem ser altamente adaptados, devido a fabricação ser unitária e proveniente de um modelo CAD e da modificação de alguns parâmetros;
- Fácil utilização de centros de usinagem CNC de três eixos;
- Ausência de geração de cavaco (sem desperdício de material);
- Custo de produção de 5 a 10% do custo de um processo de estampagem convencional;
- Fabricação de peças simétricas ou assimétricas;
- Deformações máximas elevadas, para alguns materiais;
- Operações com baixa intensidade de ruídos;
- Controle do acabamento superficial.

Porém, o processo também apresenta algumas desvantagens, como (CASTELAN, 2010; CAVALER, 2010; DALEFFE, 2008; FURLANETTI, 2014):

- Tempo de manufatura consideravelmente maior em comparação ao processo de estampagem convencional, o que limita a aplicação do processo à pequenas escalas e prototipagem;
- Baixa conformabilidade dimensional e geométrica entre peça e modelo, devido a tensões residuais nas áreas que não sofrem ação da ferramenta de conformação, promovendo o retorno elástico do material, mas já existem técnicas para minimizar esses problemas;
- Ângulos próximos a 90° necessitam de várias etapas intermediárias para sua obtenção;
- Dimensões das peças são limitadas pela área de trabalho da máquina utilizada.

## 2.7. RUGOSIDADE

Rugosidade corresponde a irregularidades finas ou erros microgeométricos, resultantes de ações inerentes ao processo de fabricação. É utilizada como parâmetro de saída para o controle do processo de usinagem (MACHADO, 2009).

Na estampagem, não é possível obter superfícies ideais. As regiões são dotadas de planicidades em maiores ou menores áreas, definindo assim a rugosidade, mesmo que, macroscopicamente, a peça seja completamente lisa (KÖNIG, 1981).

A medição é realizada pelo equipamento denominado de rugosímetro, que pode ser feita com ou sem contato entre o apalpador e a peça, onde no caso de contato, o apalpador percorre a peça, em linha reta, por uma distância previamente definida, e a ponta semiesférica de diamante capta as irregularidades e transforma esses deslocamentos em sinais elétricos (MACHADO, 2009).

### 2.7.1. Rugosidade média (Ra)

É a média dos valores absolutos das ordenadas do perfil em relação a linha média. O cálculo pode ser visto na Eq. (3) e a Fig. (17) demonstra o parâmetro Ra.

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (3)$$

Onde  $l_m$  = comprimento da amostra [ $\mu\text{m}$ ].

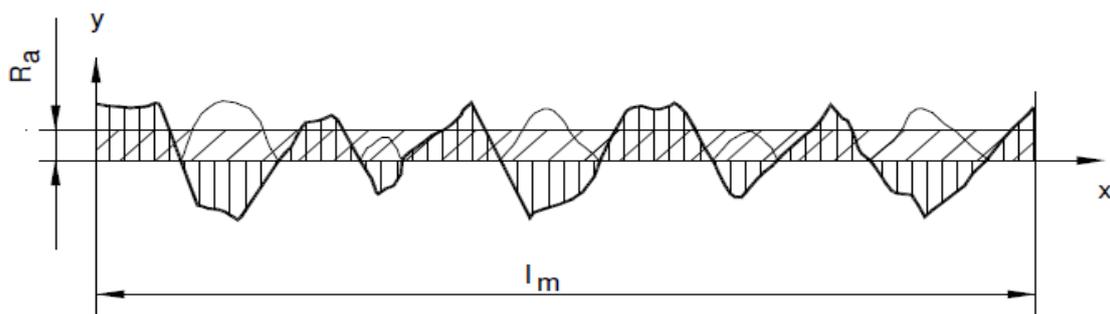


Figura 17 - Parâmetro Ra.

Fonte: (BELT, 1999).

### 2.7.2. Rugosidade de desvio médio quadrático (Rq)

O Rq é a raiz quadrada da média dos quadrados das amplitudes da superfície em relação a linha média, oferecendo uma média do desvio padrão dos dados coletados. Esse parâmetro pode ser descrito pela Eq. (4) a seguir.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Z_j^2} \quad (4)$$

Onde 'N' são o número de amostras, para uma determinada distância percorrida, e 'Z' a distância entre o vale e o pico de cada amostra dentro dessa distância medida.

### 2.7.3. Rugosidade máxima (Rz)

É a média aritmética das rugosidades singulares dos cinco trechos de medição consecutivos. Esse parâmetro é expresso pela Eq. (5).

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i \quad (5)$$

## 2.8. CARACTERIZAÇÃO DO ALUMÍNIO 1100

Devido suas propriedades, o alumínio e suas ligas, são reconhecidos como um dos materiais mais versáteis utilizado na engenharia. Suas principais propriedades são (ABAL, 2022; CALLISTER,1999; CHAVERIN,1986; IMPÉRIO DOS METAIS, 2022):

- *Leveza:* Se apresenta como uma das principais características, tendo uma densidade de 2,71 g/cm<sup>3</sup>, que é cerca de 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre.
- *Ductilidade:* Bastante elevada. Característica muito relevante, que proporciona fácil conformação mesmo em baixas temperaturas (ambiente), devido à sua microestrutura ser CFC (Cúbica de Face Centrada), capaz de amortecer impactos e reduzir tensões produzidas por variações de temperatura.
- *Resistência à corrosão:* Eficaz em alguns ambientes comuns, como a atmosfera, pois possui uma fina cama de óxido em sua superfície que lhe promove uma proteção.

- *Ponto de fusão:* Tem como temperatura de fusão o valor de 658°C, o que é baixo se comparado aos aços que estão por volta de 1570°C.
- *Condutibilidade:* Possui boa condutibilidade elétrica, 56% da IACS (*International Annealed Copper Standard*), que está associada à sua baixa densidade, permitindo conduzir tanta eletricidade quanto o cobre. A condutibilidade térmica também é boa de 0,52 – 0,56 cal/cm°C, cerca de 4,5 vezes a condutividade média do aço, estando atrás do ouro, prata e cobre.
- *Reflexibilidade:* Possui elevada reflexibilidade, acima de 80%, que viabiliza seu uso em luminárias, por exemplo.
- *Não magnético:* Devido essa característica, é muito utilizado como proteção de equipamentos eletrônicos, também não produz faísca, sendo ideal para armazenamento de substâncias inflamáveis e/ou explosivas.
- *Reciclável:* É altamente reciclável, pois não perde, de maneira significativa, suas propriedades.
- *Disponibilidade:* Facilmente encontrado na natureza.
- *Atrito:* próximo ao do aço (0,5) e inferior ao do aço inox (1,0).

A Tab. (3) a seguir mostra um comparativo entre as propriedades de quatro materiais.

Tabela 3 - Comparativo de propriedades de diferentes metais.

Propriedades	Alumínio puro	Alumínio 1100	Aço	Cobre
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	2,70	2,71	7,86	8,96
Temperatura de fusão [°C]	660	658	1570	1083

Modulo de elasticidade [MPa]	70000	69000	205000	110000
Condutibilidade térmica a 25°C [cal/cm °C]	0,53	0,54	0,12	0,94
Condutibilidade elétrica [% IACS]	61	62	14,5	100

Fonte: (ABAL, 2022; IMPÉRIO DOS METAIS, 2022).

Embora o alumínio, de maneira geral, apresente valores de resistência mecânica inferior ao aço, com base no peso, ele será capaz de suportar uma carga maior. Outra forma de aumentar a resistência mecânica do alumínio é através da deformação plástica a frio ou mediante a formação de ligas, porém ambos processos diminuem a resistência a corrosão do material (CALLISTER,1999).

Existe uma variedade de ligas de alumínio, o que dificulta a padronização da nomenclatura de todas, de modo a combinar as propriedades do alumínio com outros materiais, como Cobre, Magnésio, Silício, Manganês e Zinco. Essas ligas são comumente utilizadas pela indústria em aplicações específicas (CHAVERINI,1986).

A obtenção das propriedades principais de um material como limite de resistência, limite de escoamento, grau de encruamento e anisotropia do material, podem ser obtidos mediante ensaios de tração que são normalizados pela norma ABNT 6152 2002. Os dados obtidos como resultado da deformação do corpo de prova devido uma carga de tração, resultam em uma curva característica, que pode ser visualizada na Fig. (18) abaixo.

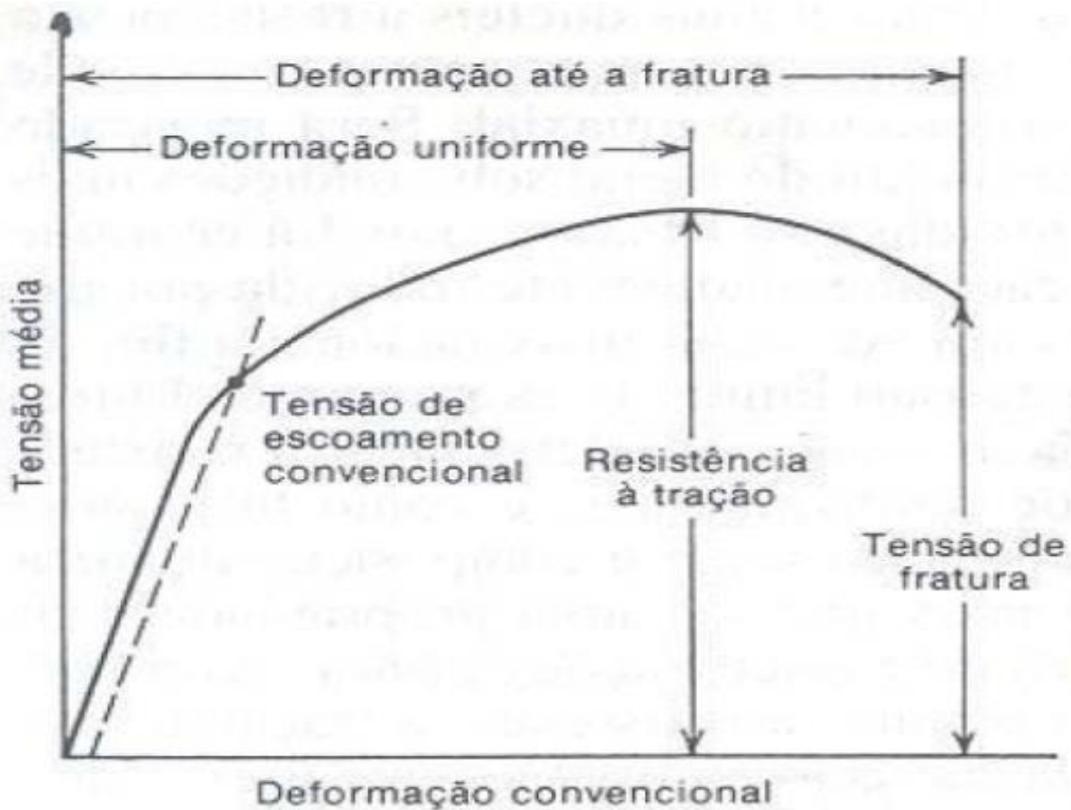


Figura 18 - Curva tensão-deformação para engenharia.

Fonte: (DALEFFE, 2008).

Após o valor do limite de escoamento, a deformação do material passa a ser permanente, e o material encrua, sendo necessária uma carga maior para deformar essa mesma região do material (DALEFFE, 2008).

A Tab. (4) apresenta os valores obtidos por diferentes pesquisadores, para o alumínio 1100 quando submetido à ensaios de tração.

Tabela 4 - Valores de ensaios de tração para o Alumínio 1100.

Propriedade/ Pesquisador	Rogério (1984)	Jovani (2007)	Anderson (2008)	Olmete (2009)
Ten. Max. Res. Tração [MPa]	120	115	120	117
Ten. Max. Escoamento [MPa]	98	88	90	98

Fonte:( TAVARES, 1984; CASTELAN,2007; DALEFFE, 2008; FILHO, 2009;).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais, ferramentas, métodos e rotinas de trabalho que foram utilizadas nos testes de estampagem incremental de ponto único com o alumínio 1100. A estampagem incremental de ponto único foi escolhida devido maior facilidade de realização. Os testes foram realizados no Laboratório de Processos de Fabricação da Universidade de Brasília, Faculdade Gama (UnB-Fga).

#### 3.1. FERRAMENTA UTILIZADA

Para realização dos testes, foi utilizada uma ferramenta com duas extremidades semiesféricas, de aço SAE 1045, disponibilizada pelo Prof. Dr. Pablo José da Silva do IFB (Instituto Federal Brasília), de 126 mm de comprimento e 13mm de diâmetro. A Fig. (19) ilustra a ferramenta utilizada.

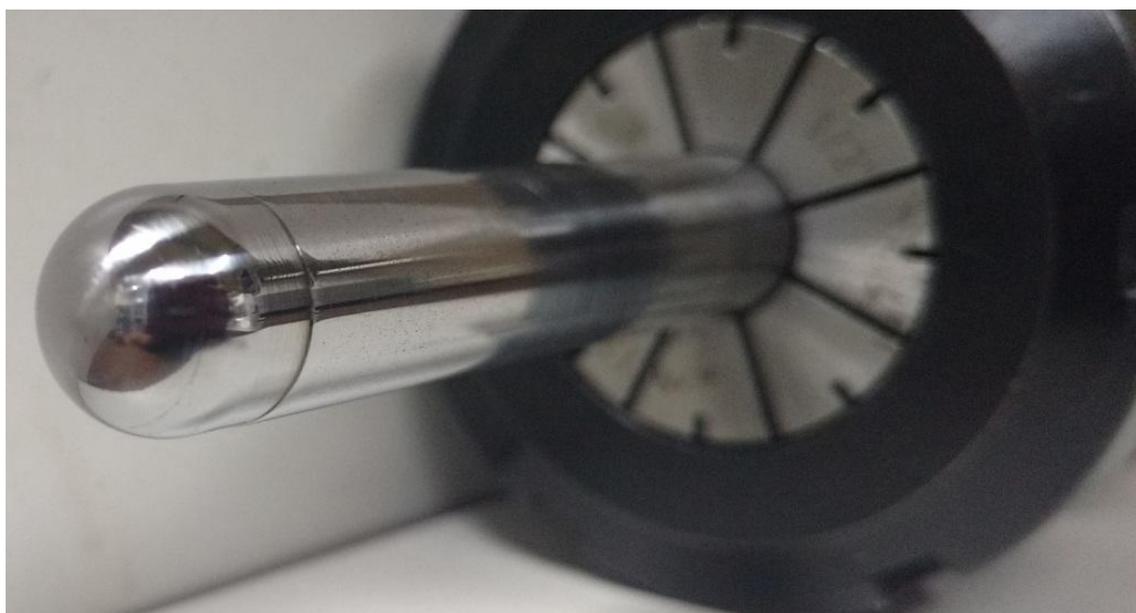


Figura 19 – Ferramenta semiesférica utilizada nos testes.

Fonte: (SILVA, 2017).

#### 3.2. PRENSA CHAPAS

O equipamento que será utilizado para fixação da chapa na mesa do centro de usinagem CNC é composto de uma chapa de fixação de 370x256x10 mm de Aço A36 comumente utilizado na construção civil, muito semelhante ao aço 1020, quatro tarugos de aço 1045 com 76 mm de comprimento total, 21 mm de diâmetro maior, 12 mm de diâmetro menor com rosca M12 de passo 1,25, e um furo interno 12 mm com

rosca M10 de passo 1,5, que são rosqueados na chapa de fixação e no suporte inferior de fixação do *Blank*. O fixador do *Blank* é composto de dois quadrados de 250x250x25 mm com uma cavidade interna de 148 x 148 mm em aço, com 24 furos, sendo 20 com roscas M12 apenas no fixador inferior. O Fixador do *Blank* também foi cedido pelo Prof. Dr. Pablo José da Silva. A Fig. (20), ilustram o dispositivo. Para mais informações, verificar o Anexo I.

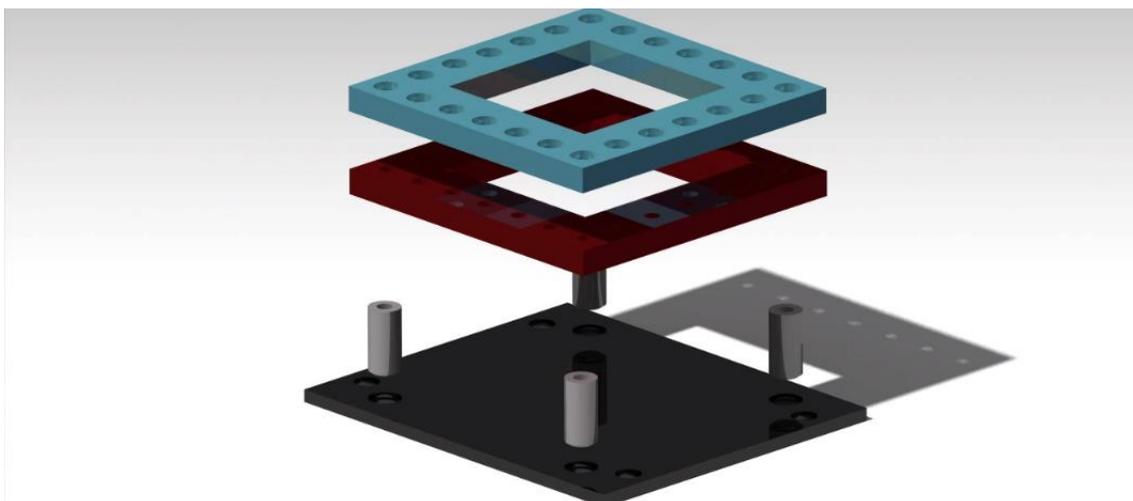


Figura 20 – Modelo do prensa chapas em CAD.

Fonte: Autor.

### 3.3. GEOMETRIA DE ESTAMPAGEM

A geometria de estampagem que foi confeccionada é de um tronco de cone, que é uma geometria com um grau de complexidade significativo, com o diâmetro menor, fixo, de 48 mm, com profundidade, fixa, de 51 mm e diâmetro maior, inicial, de 120 mm e ângulo de parede, inicial, de 54°, devido ser um valor já verificado como passível de conformação. A geometria pode ser visualizada na Fig. (21) abaixo.

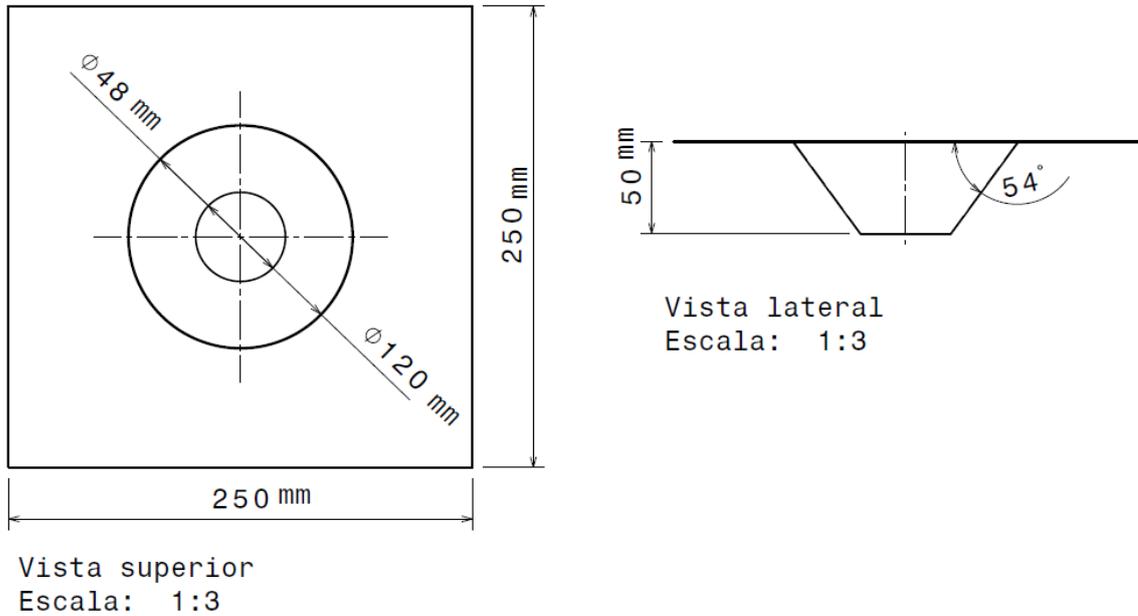


Figura 21 - Geometria de estampagem.

Fonte: Autor.

O modelo foi confeccionado no software *Catia V5R21*®, da *Dessaut Systems*, e posteriormente transferido para o *Fusion 360*®, da *Autodesk*, onde então foi gerado o caminho que a ferramenta deve percorrer, detalhes dessa programação podem ser vistos no Anexo II. A Fig. (22) a seguir ilustra o caminho da ferramenta, que é do tipo helicoidal, que garante o contato constante da ferramenta com a superfície da chapa.

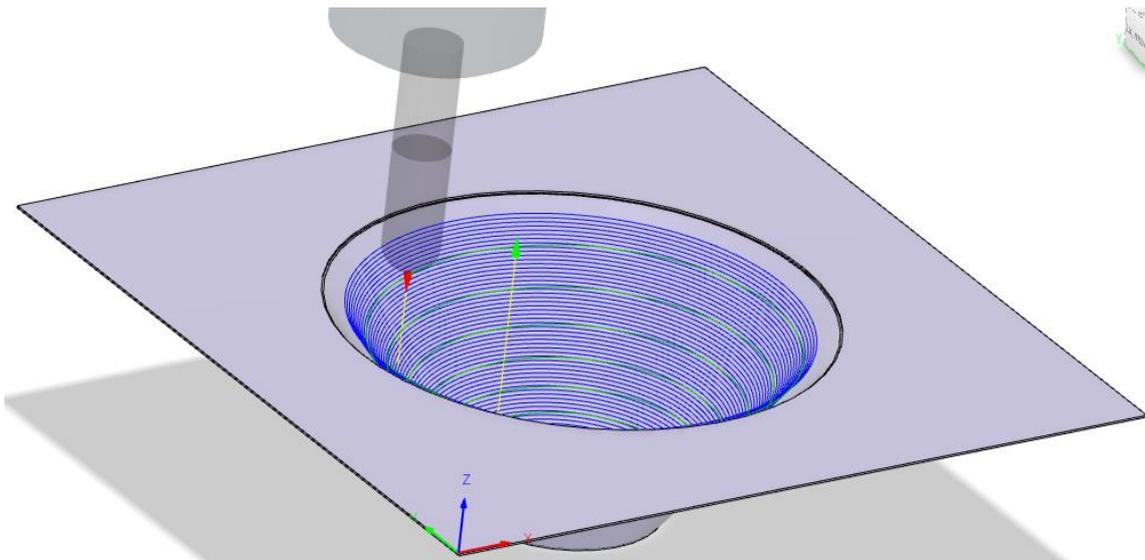


Figura 22 - Caminho da ferramenta gerado após considerados todos os parâmetros de teste no software (geometria, passo, avanço, rotação...).

Fonte: Autor.

Devido a geometria, o caminho da ferramenta ocorre da região mais externa para interna, pois essa movimentação que é responsável pela criação do ângulo da geometria e promover o contato constante da ferramenta com a chapa, de modo a não remover a força da ferramenta contra a chapa, além de, também, proporciona o deslocamento do material da chapa para a região mais central, o que auxilia na conformação de uma profundidade maior.

### 3.4. LUBRIFICAÇÃO

O lubrificante utilizado foi o óleo lubrificante sintético Selenia 5w30 para motores da marca Petronas. É despejada uma pequena quantidade de lubrificante sobre a chapa, de modo a recobrir a área a ser percorrida pela ferramenta, antes de iniciar o processo e também ao longo do mesmo, se necessário, visto que o lubrificante atua na dissipação de calor, redução de desgaste e redução na força de conformação. Não foram realizados testes sem a utilização de lubrificantes pois, em pesquisas anteriores, a ausência do lubrificante resulta no rompimento precoce da chapa.

### 3.5. CORPOS DE PROVA PARA ESTAMPAGEM (*BLANKS*)

Os corpos de provas (*Blanks*) foram 16 chapas de alumínio 1100, de 250 x 250 mm com espessura de 0,5 mm, mostrada na Fig. (23) cortadas com tesoura. Para melhor fixação no dispositivo, a chapa foi furada de acordo com o local por onde os parafusos passam, embora seja o prensa chapas é que faz a fixação da mesma.



Figura 23 - Chapa de alumínio 1100 cortada e furada.

Fonte: Autor.

### 3.6. CENTRO DE USINAGEM

Para realização do processo de estampagem incremental de ponto simples (SPIF), foi utilizado o centro de usinagem CNC D600, da marca ROMI® mostrada na Fig. (24) a seguir. As principais informações da máquina são apresentadas na Tab. (5).



Figura 24 - Centro de usinagem CNC para realização dos testes.

Fonte: Autor.

Tabela 5 - Dados da CNC D600.

Potência total	18kVA
Motor principal	10 cv
Comando	Fanuc OI-MD
Cone do eixo-árvore	ISO40
Faixa de velocidades	7500 rpm
Avanços rápidos em X e Y	30 m/min
Avanços rápidos em Z	30 m/min
Curso no eixo X	600 mm
Curso no eixo Y	530 mm

Curso no eixo Z	580 mm
Superfície da mesa	840 x 500 mm
Peso admissível sobre a mesa	800 kg
Diâmetro máximo de ferramenta	80 mm

Fonte: (ROMI, 2022; ETC MÁQUINAS, 2022).

### 3.7. FLUXOGRAMA

O processo de investigação do ângulo máximo de parede para a geometria propostas foi executado como é apresentado no fluxograma apresentado na Fig. (25).

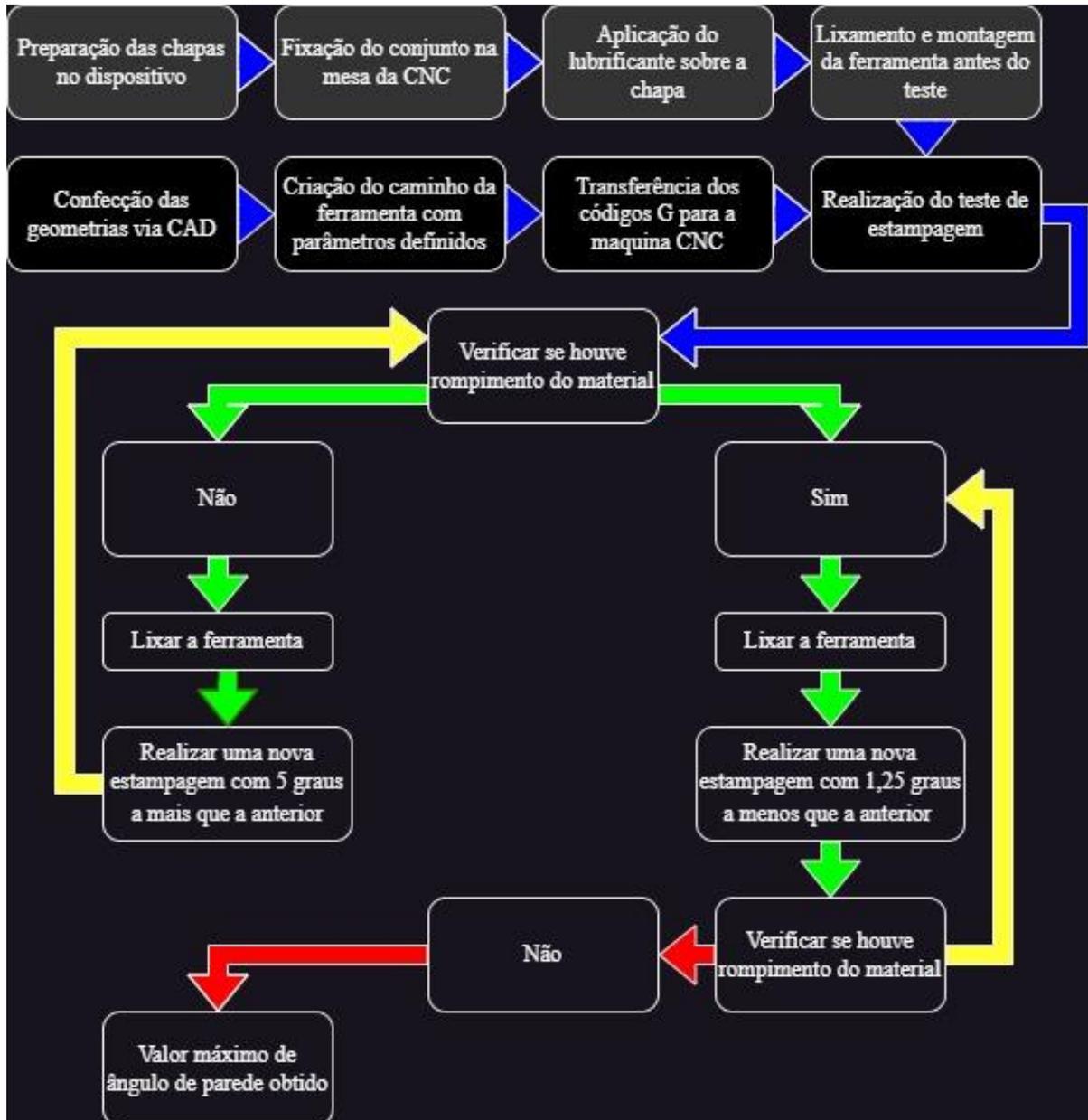


Figura 25 - Fluxograma de teste para análise do ângulo máximo de parede.

Fonte: Autor.

### 3.8. PROCEDIMENTO PARA VERIFICAÇÃO DO ÂNGULO MÁXIMO DE PAREDE UTILIZANDO O ALUMÍNIO 1100.

Para verificação do ângulo máximo de parede, foi estabelecida a seguinte estratégia. A geometria, ilustrada pela Fig. (21), foi recriada no software *Fusion 360*®, onde, então, os parâmetros do teste são inseridos e o caminho da ferramenta é gerado. Nos testes, apenas o ângulo de parede e, por consequência, o diâmetro maior da geometria sofreram alterações, os demais parâmetros foram mantidos. Os parâmetros fixos para os testes foram os seguintes:

- Passo (incremento vertical): 0,5 mm;
- Avanço da ferramenta: 1500 mm/min;
- Rotação da ferramenta: 100 rpm;
- Quantidade de óleo 5w30: 50 ml;
- Ferramenta: de ponta semiesférica de 13 mm de diâmetro;
- Lixamento da ferramenta com 3 lixas, de diferentes granulometrias (2000,3000 e 5000) banhada com fluido de corte, antes da realização de cada teste para remoção de qualquer material que pudesse estar aderido.

Definidos os parâmetros fixos, os testes ocorreram da seguinte forma:

A primeira geometria, Fig. (21) com os parâmetros indicados anteriormente, obteve êxito na conformação (não houve rompimento do material), por conta disso, foi confeccionada uma nova geometria com um novo ângulo de parede  $5^\circ$  a mais que o anterior ( $54^\circ$  para  $59^\circ$ ), onde foi constatada a ruptura do material. Por conta dessa falha, foram realizados novos testes reduzindo o valor do ângulo de parede, em  $1^\circ 25'$  do valor do ângulo no qual houve a falha (1/4 do valor do intervalo entre o primeiro e segundo teste), até que fosse obtida uma nova geometria sem a falha do material, para melhor compreensão, consulte o fluxograma de teste na Fig. (25).

### 3.9. PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE DA GEOMETRIA ESTAMPADA.

Após realizado o procedimento de estampagem da geometria proposta, foram realizada a medição das rugosidades ( $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_z$ ) da superfície interna das geometrias obtidas com o rugosímetro digital *Mitutoyo SJ-210*, Fig. (26), em três pontos diferentes no sentido de laminação da chapa (próximo da borda, no meio da geometria e próximo ao fundo), como mostrado na Fig. (27) e depois rotacionada em  $180^\circ$  e realizadas mais três medições nas mesmas posições.



Figura 26 - Rugosímetro digital *Mitutoyo SJ-210*.

Fonte: Autor

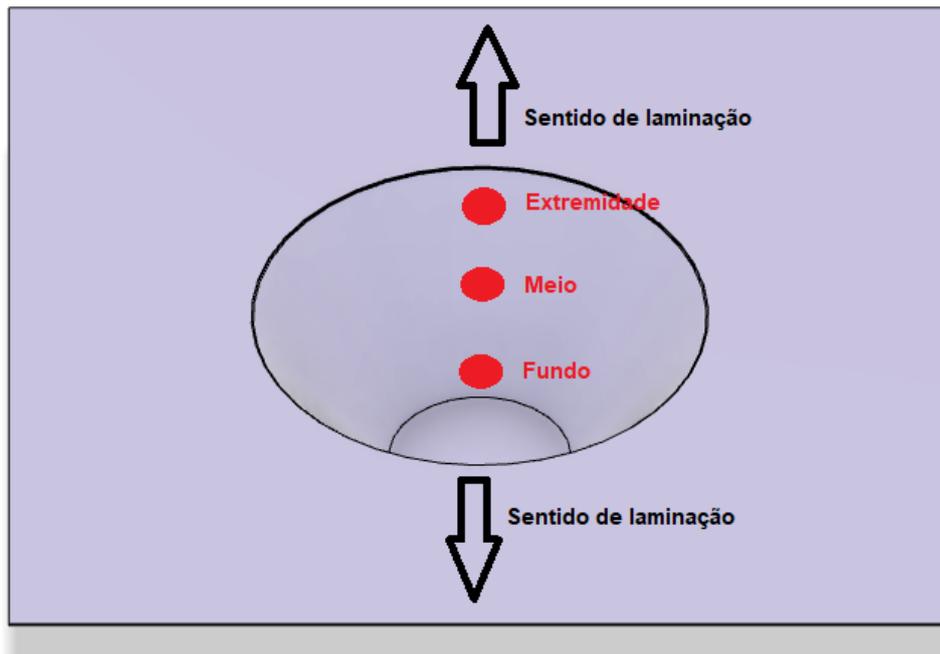


Figura 27 – Locais de medição da rugosidade.

Fonte: Autor.

A Fig. (28) ilustra o procedimento de medição das rugosidades Ra, Rq e Rz.

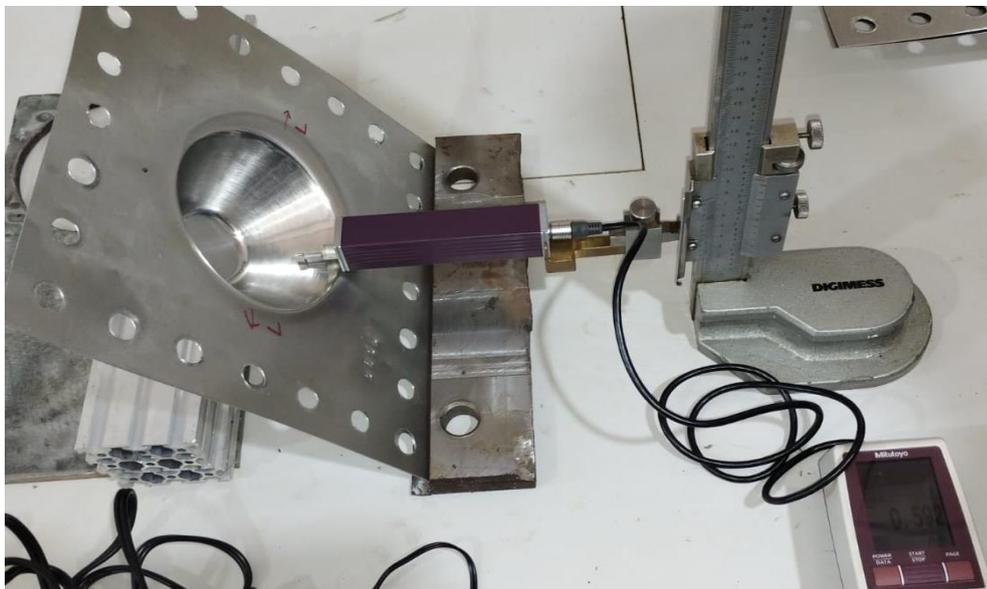


Figura 28 - Medição da rugosidade.

Fonte: Autor

### 3.10. PLANEJAMENTO FATORIAL

Planejamento fatorial é uma metodologia que compõe o Planejamento Experimental, que é baseado em princípios estatísticos que resultam em um sistema de estudo com o máximo de informações úteis, com o mínimo de experimentos (NETO, SCARMINIO, & BRUNS,2001).

O planejamento fatorial tem como objetivo descobrir como os fatores interferem nas respostas estudada. Ele é realizado mediante a todas as combinações possíveis dos fatores analisados (NETO, SCARMINIO, & BRUNS,2001).

Nesta pesquisa, além da avaliação do ângulo máximo de parede, foi realizado um planejamento fatorial de  $2^2$ , onde será verificada a influência da variação de dois parâmetros, neste caso o passo e a velocidade de avanço em relação a rugosidade da peça, e como resultado desse planejamento, foi possível a confecção de uma superfície de respostas, que demonstra qual dos dois fatores tem maior influência no valor de saída, no caso, a rugosidade.

O passo teve seus valores escolhidos por estes já terem sido utilizados em testes por outros autores, inclusive para a avaliação da rugosidade da superfície, porém esses valores eram os únicos que variavam nos testes. Os valores são 0,3 mm e 0,5 mm, este já utilizado nos testes para verificação do ângulo máximo de parede.

Com relação ao avanço, foi mantido o valor de 1500 mm/min, pois já foi considerado nos testes de ângulo máximo de parede, e foi calculado um valor de 900 mm/min com base na proporção entre os valores de 0,3 e 0,5 mm do passo.

A Tab. (6) a seguir mostra a disposição dos dados.

Tabela 6 - Fatores e seus níveis.

Passo [mm]	Avanço [mm/min]
0,3 (-)	900 (-)
0,5 (+)	1500 (+)

Fonte: Autor.

Os experimentos para a execução do planejamento fatorial  $2^2$  consiste na combinação desses quatro fatores, o que necessita de quatro testes, porém, os experimentos foram realizados em tréplica, totalizando então um total de 12 experimentos, onde foram realizadas seis medições, em réplica, em cada peça obtida, para obtenção da média de rugosidade média (Ra) para cada teste. Levantados esses valores, foi então calculado o efeito principal, o efeito de interações e confeccionada a superfície de resposta (NETO, SCARMINIO, & BRUNS,2001).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. VERIFICAÇÃO DO ÂNGULO MÁXIMO DE PAREDE.

Com relação aos testes referentes ao ângulo máximo de parede para a geometria a ser estampada, o primeiro teste, utilizando o ângulo de parede de  $54^\circ$ , teve êxito. A Fig. (29) mostra a geometria obtida.



Figura 29 - Geometria com ângulo de  $54^\circ$  a) vista superior. b) vista lateral.

Fonte: Autor.

Como o primeiro teste foi bem-sucedido, foi realizado o segundo teste com a geometria com o ângulo de parede de  $59^\circ$ . O teste não foi bem-sucedido, a chapa rompeu logo no início do teste como pode ser visto na Fig. (30).



Figura 30 - Geometria com ângulo de  $59^\circ$ .

Fonte: Autor.

Em virtude da falha no ângulo de  $59^\circ$ , os testes subsequentes foram realizados com uma angulação menor até ser obtida uma geometria sem falhas. Os testes foram realizados reduzindo o ângulo de parede testado, com ruptura, em  $1^\circ,25'$ .

O teste subsequente foi com o ângulo de  $57^\circ,75'$  e também não obteve êxito. Ocorreram furos na parede da geometria embora a conformação tenha sido completa, como pode ser visto na Fig. (31) a seguir.

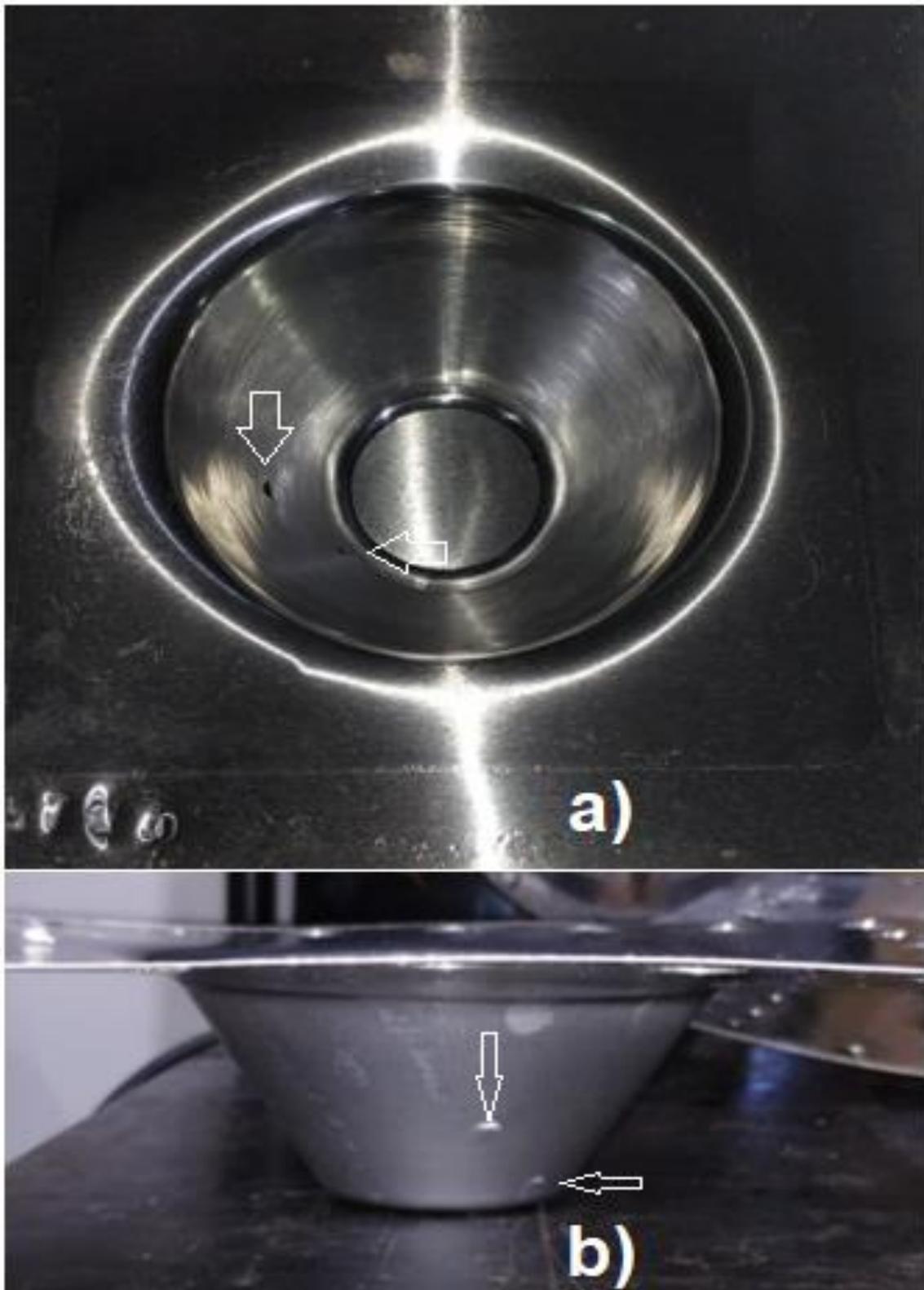


Figura 31 - Geometria com angulo de  $54^{\circ},75'$ . a) vista superior. b) vista lateral.

Fonte: Autor.

Foi realizado então um teste, mas pegando o valor do primeiro teste,  $54^\circ$ , como valor inicial e foi acrescido o mesmo intervalo, fazendo a conformação de uma geometria de  $55^\circ,25'$ . O teste foi bem-sucedido como pode ser visto na Fig. (32) a seguir.



Figura 32 - Geometria com ângulo de  $55^\circ,25'$ . a) vista superior. b) vista lateral.

Fonte: Autor.

Por fim, foi realizado o teste com o valor de  $56^{\circ},5'$  que era o valor restante para o intervalo definido pela variação dos ângulos em  $1^{\circ},25'$ . O teste também foi bem-sucedido como pode ser visto na Fig. (33).

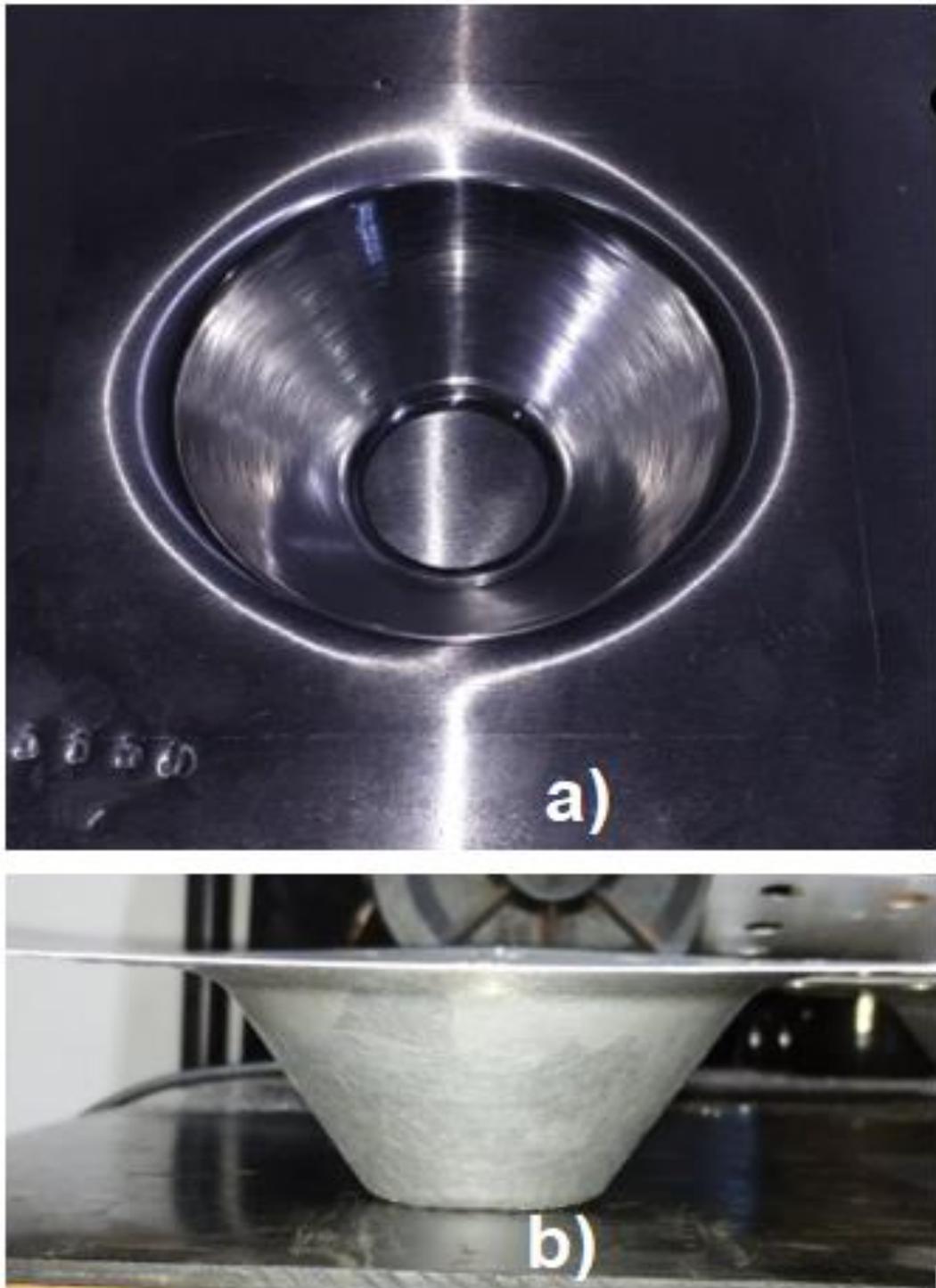


Figura 33 - Geometria com ângulo  $56^{\circ},5'$ . a) vista superior. b) vista lateral.

Fonte: Autor.

Após realizados os testes, o ângulo máximo de parede para a chapa de alumínio 1100, utilizando a ferramenta semiesférica de aço 1045, com 13 mm de diâmetro, com passo de 0,5 mm, avanço de 1500 mm/min e rotação de 100 rpm utilizando óleo 5w30 com lubrificante, é de 56° ,5' sem que haja rompimento da chapa e que a conformação da geometria seja completa.

#### 4.2. VERIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE DA GEOMETRIA.

Após realizado os testes, as geometrias que obtiveram sucesso na conformação (não romperam), foram submetidas aos testes de rugosidade com o rugosímetro digital. Além de verificar as diferenças nas rugosidades devido a variação do ângulo de parede das geometrias, essas medições também serviram para definir qual das diferentes geometrias seria utilizada no planeamento fatorial.

Foram realizadas as medições das rugosidades da chapa sem a conformação e no sentido de laminação, os resultados estão descritos na Tab. (7) a seguir.

Tabela 7 - Rugosidades para chapa sem conformação.

<b>Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Rq [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Rz [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
0,153	0,197	1,042
0,238	0,299	1,521
0,149	0,189	1,053
Média: 0,180	Média: 0,228	Média: 1,205
Desvio padrão: 0,050	Desvio padrão: 0,061	Desvio padrão: 0,273

Os resultados das medições, assim como as médias, estão apresentados nas Tabs. (8) a (10). Lembrando que todas as medições foram realizadas no sentido de laminação da chapa na extremidade (E), no meio (M) e no fundo (F) da geometria como mostrado na Fig. (27).

Tabela 8 - Rugosidades para geometria de 54°.

<b>Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Rq [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Rz [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
0.582 (E)	0.778 (E)	3.923 (E)
0.523 (M)	0.635 (M)	2.868 (M)
0.607 (F)	0.609 (F)	2.298 (F)
0.561 (E)	0.682 (E)	2.777 (E)
0.569 (M)	0.705 (M)	3.566 (M)
0.669 (F)	0.776 (F)	3.502 (F)
Média: 0.585	Média: 0.698	Média: 3.144
Desvio padrão: 0,049	Desvio padrão: 0,070	Desvio padrão: 0,606

Fonte: Autor.

Tabela 9 - Rugosidades para geometria 55,25'

<b>Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Rq [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Rz [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
0.644 (E)	0.735 (E)	2.482 (E)
0.635 (M)	0.800 (M)	3.499 (M)
0.530 (F)	0.646 (F)	2.516 (F)
0.409 (E)	0.499 (E)	1.741 (E)
0.550 (M)	0.649 (M)	2.588 (M)

0.570 (F)	0.681 (F)	2.961 (F)
Média: 0.556	Média: 0.668	Média: 2.631
Desvio padrão: 0,075	Desvio padrão: 0,101	Desvio padrão: 0,582

Fonte: Autor.

Tabela 10 - Rugosidades para geometria de 56°,5'.

<b>Ra [μm]</b>	<b>Rq [μm]</b>	<b>Rz [μm]</b>
0.430 (E)	0.490 (E)	1.818 (E)
0.694 (M)	0.812 (M)	2.566 (M)
0.499 (F)	0.578 (F)	1.926 (F)
0.435 (E)	0.517 (E)	2.107 (E)
0.519 (M)	0.65 (M)	2.879 (M)
0.525 (F)	0.638 (F)	3.243 (F)
Média: 0.509	Média: 0.612	Média: 2.423
Desvio padrão: 0,096	Desvio padrão: 0,116	Desvio padrão: 0,586

Fonte: Autor.

Os resultados das rugosidades Ra, Rq e Rz para cada ângulo de parede, estão apresentados na Fig. (34) a seguir.

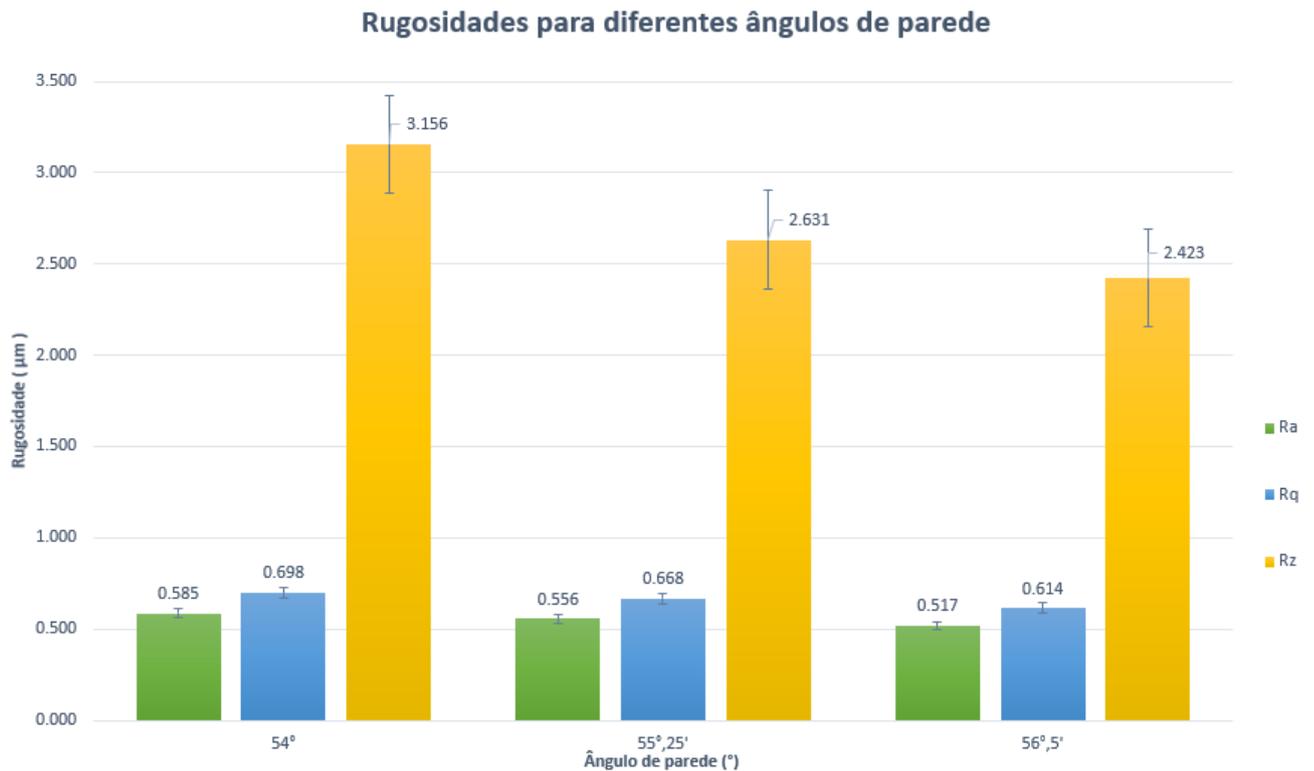


Figura 34 - Gráfico das rugosidades para cada ângulo de parede obtido.

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados de valores médios de rugosidade para cada geometria, a que possui o ângulo de parede 56°,5' foi a que apresentou a menor rugosidade, o que está dentro do esperado, visto que a angulação maior, faz com que o material se desloque mais em um dos eixos cartesianos, neste caso em Z, promovendo uma superfície mais lisa.

Conhecendo qual a geometria com melhor acabamento superficial, foram propostos e realizados os testes do planejamento fatorial.

#### 4.3. PLANEJAMENTO FATORIAL

Na execução do planejamento fatorial, foram realizados quatro experimentos combinando as quatro variáveis em tréplica, totalizando 12 testes, realizados de maneira aleatória para que não ocorresse a propagação de erros experimentais, de modo que a probabilidade de um fator externo interferir no teste, é a mesmo para todos os experimentos.

Após feita a distribuição, a ordem dos experimentos está representada na Tab. (11) a seguir.

Tabela 11 - Matriz de planejamento.

Teste	Passo [mm]	Avanço [mm/min]
1	0,3	900
2	0,3	1500
3	0,5	1500
4	0,3	1500
5	0,5	1500
6	0,5	900
7	0,3	900
8	0,3	900
9	0,5	1500
10	0,5	900
11	0,3	1500
12	0,5	900

Fonte: Autor.

Os testes foram realizados seguindo passos semelhantes aos testes de verificação do ângulo máximo de parede;

- Utilização de 40ml de óleo lubrificante sobre a chapa;

- Lixamento da ferramenta com três diferentes lixas (granulometrias de 2000, 3000 e 5000) e fluido de corte antes da realização de cada estampagem.
- Utilização da geometria com diâmetro menor de 48 mm, 51mm de profundidade e ângulo de parede de  $56^{\circ},5'$ .
- Rotação fixada em 100 rpm.

As peças obtidas em cada teste podem ser visualizadas nas Figs. (35) a (40) a seguir.

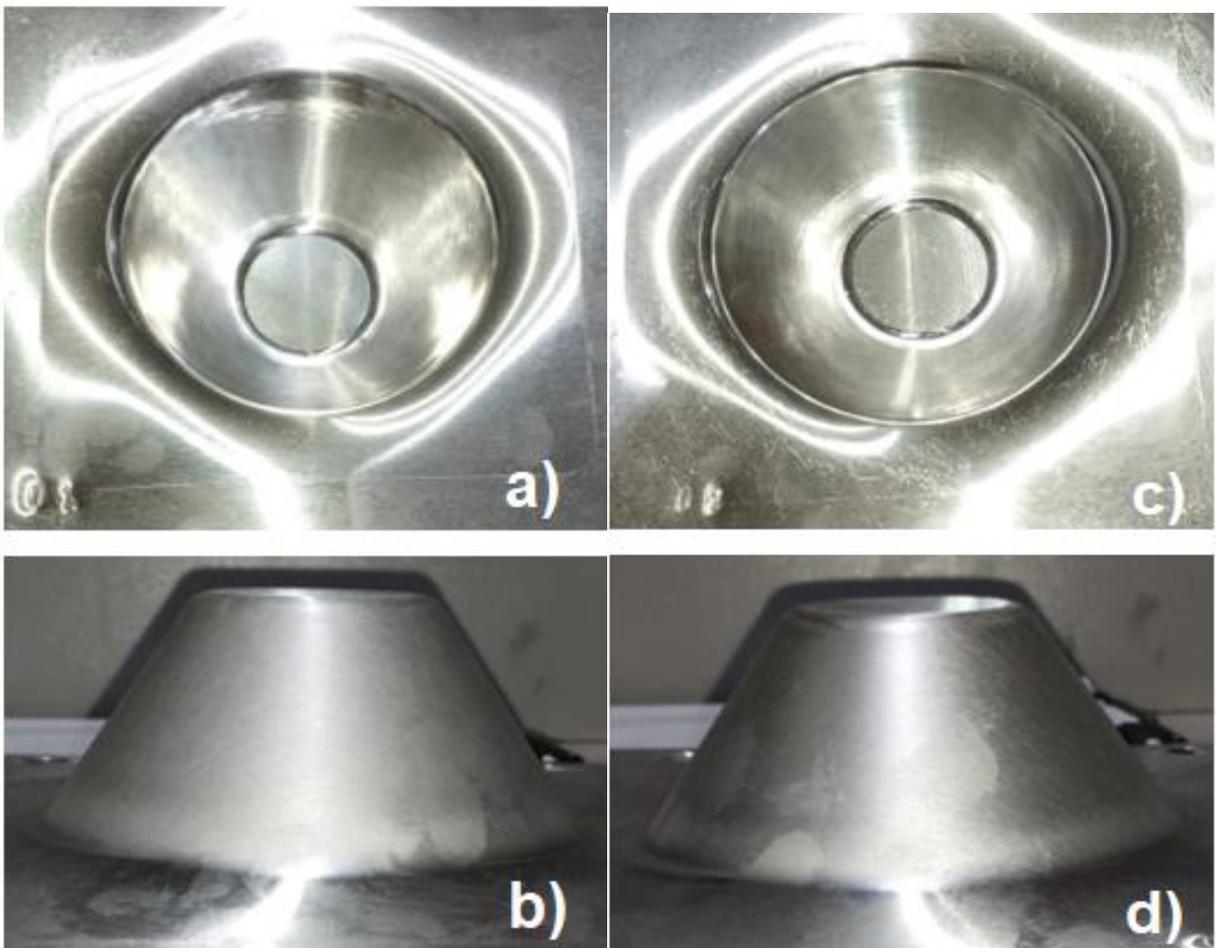


Figura 35 - Planejamento fatorial: Testes 1 e 2. a) vista superior teste 1, b) vista lateral do teste 1, c) vista superior teste 2 e d) vista lateral teste 2.

Fonte: Autor.

Nos dois primeiros testes, não foram constatadas nenhuma imperfeição visível nas superfícies de estampagem.

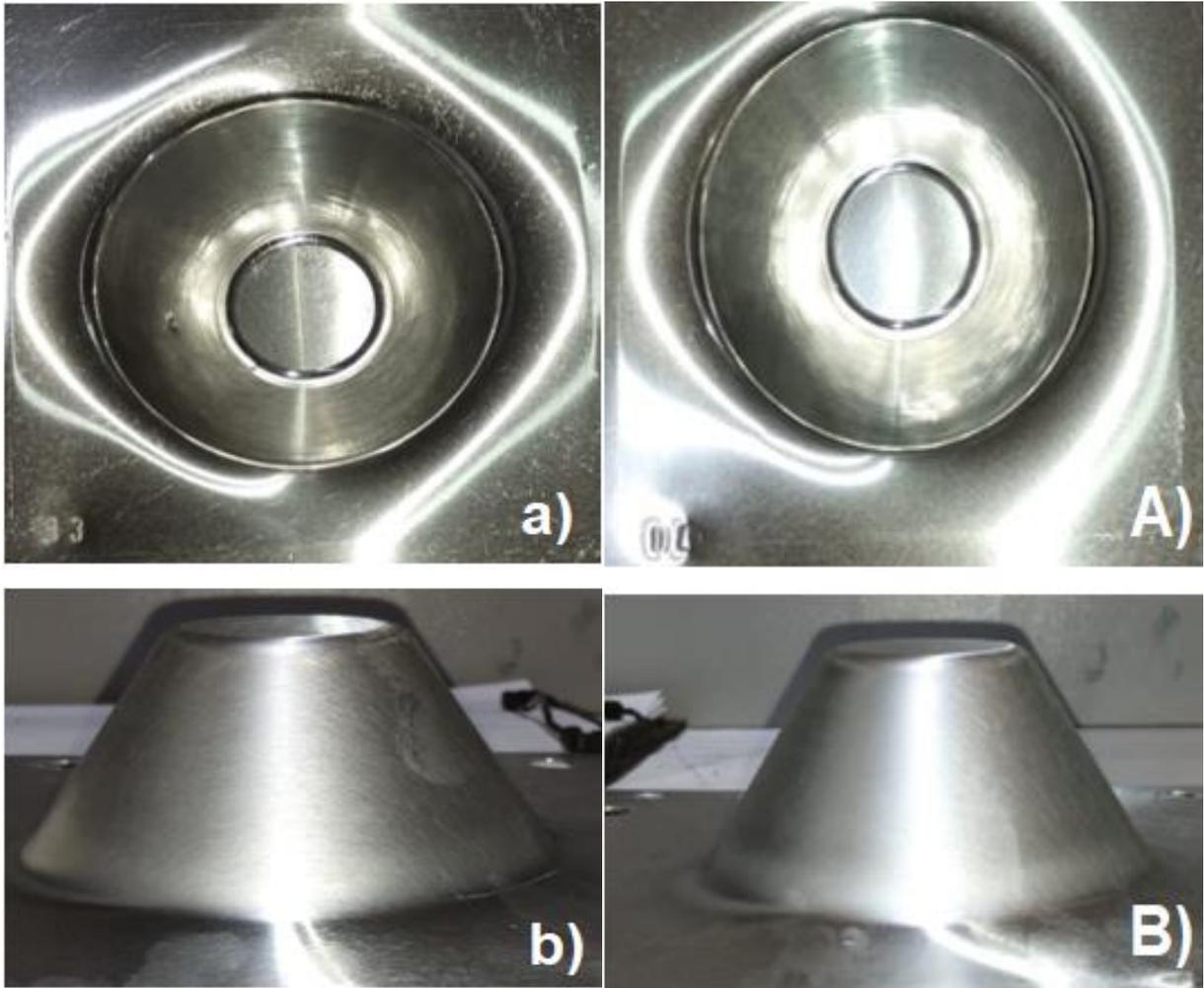


Figura 36 - Planejamento fatorial: Testes de 3 e 4. a) e A): vista superior; b) e B): vistas laterais; testes 3 e 4 respectivamente.

Fonte: Autor.

É possível notar que no Teste 3, há uma marca na superfície interna no lado esquerdo da peça, mas não houve o rompimento do material. Acredita-se que uma impureza no lubrificante tenha causado essa deformação após ter aderido a ferramenta e ter sido comprimida contra a chapa devido o sentido de rotação e de movimentação da ferramenta.

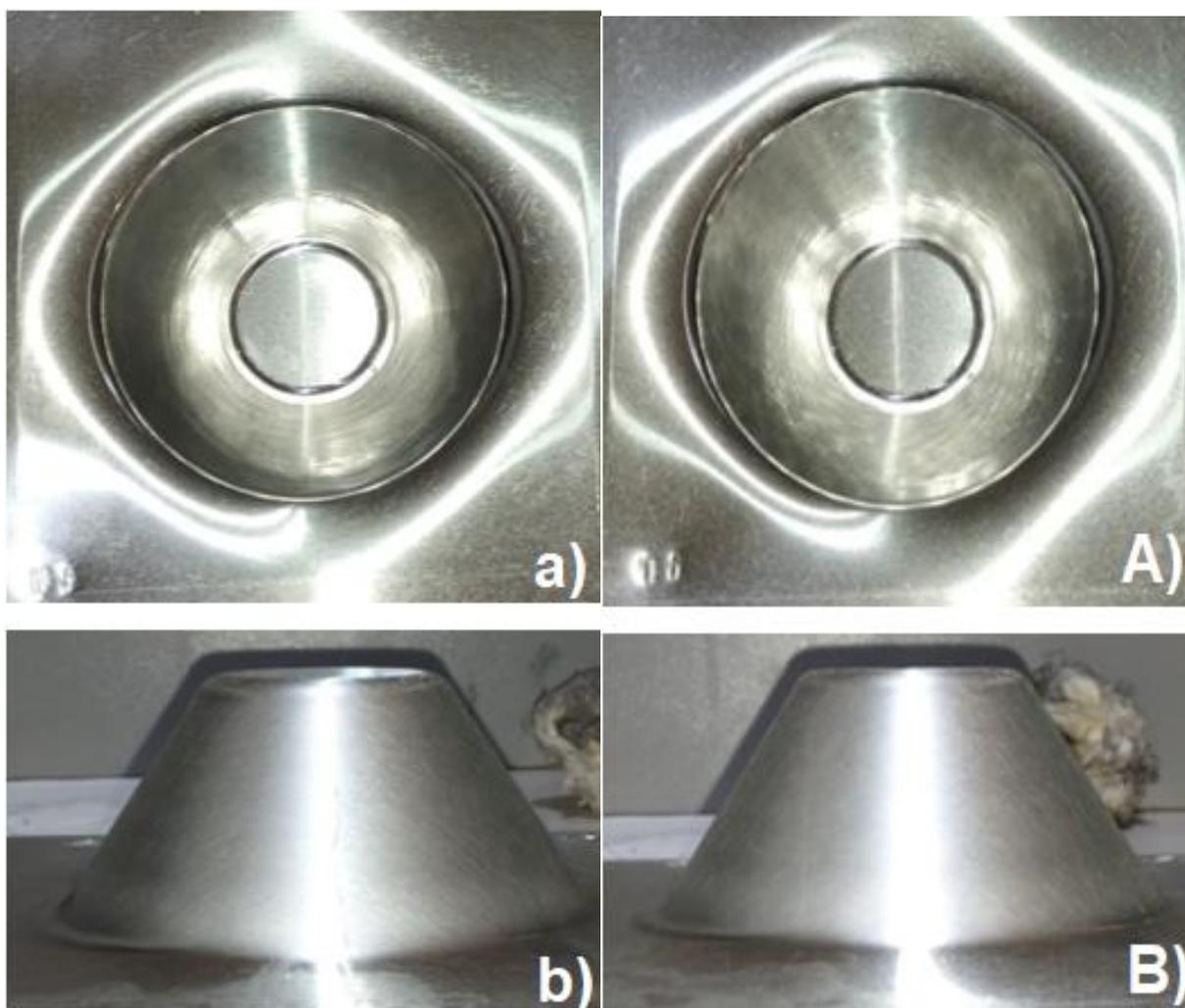


Figura 37 - Planejamento fatorial: Testes 5 e 6. a) e A): vistas superiores e b) e B) vistas laterais dos testes 5 e 6 respectivamente.

Fonte: Autor.

Nos testes 5 e 6, a estampagem ocorreu dentro do esperado, sem alterações de forma e rompimento do material.

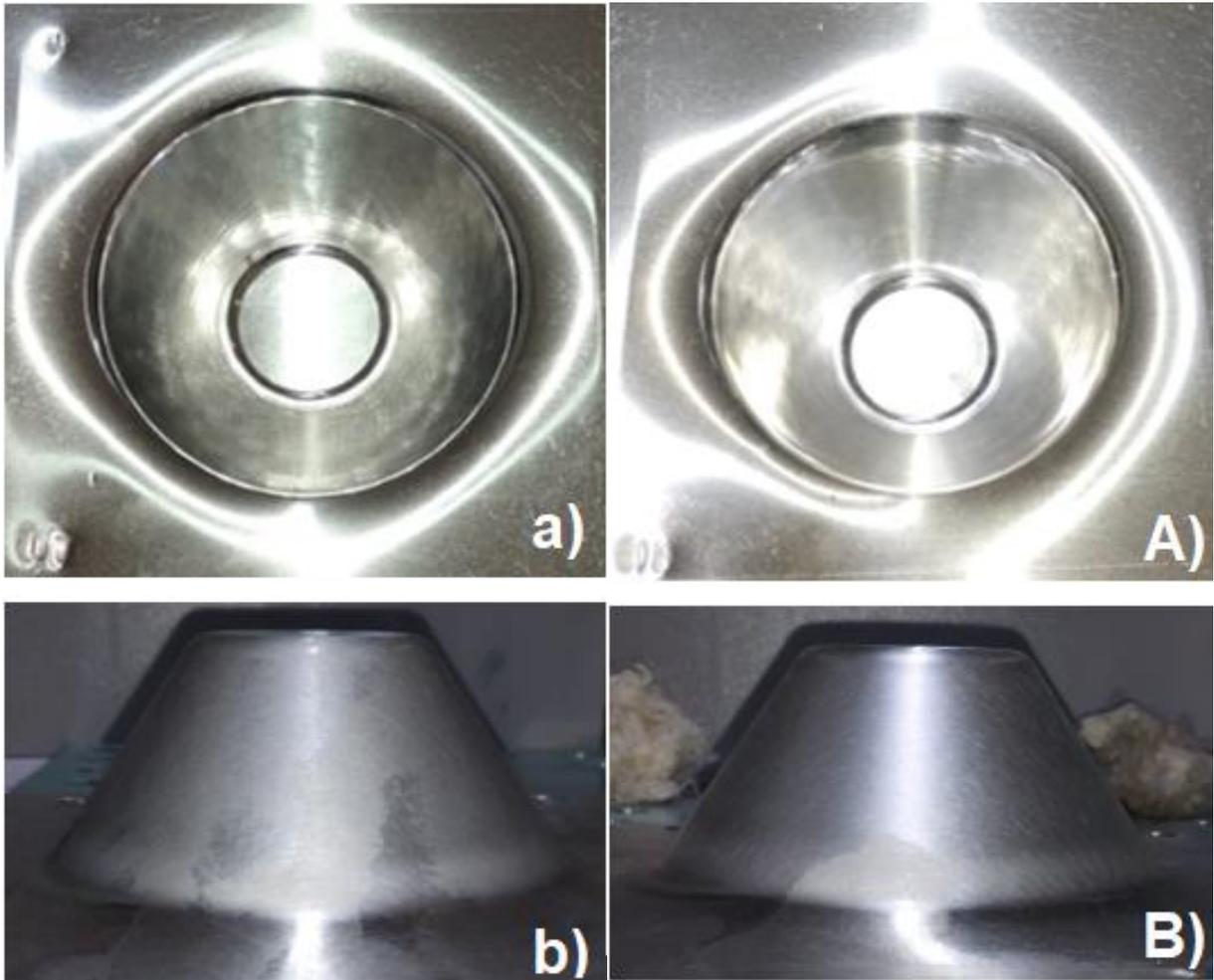


Figura 38 - Planejamento fatorial. Testes 7 e 8. a) e A): vistas superiores e b) e B) vistas laterais dos testes 7 e 8 respectivamente.

Fonte: Autor.

Os testes 7 e 8 não apresentaram intercorrências.

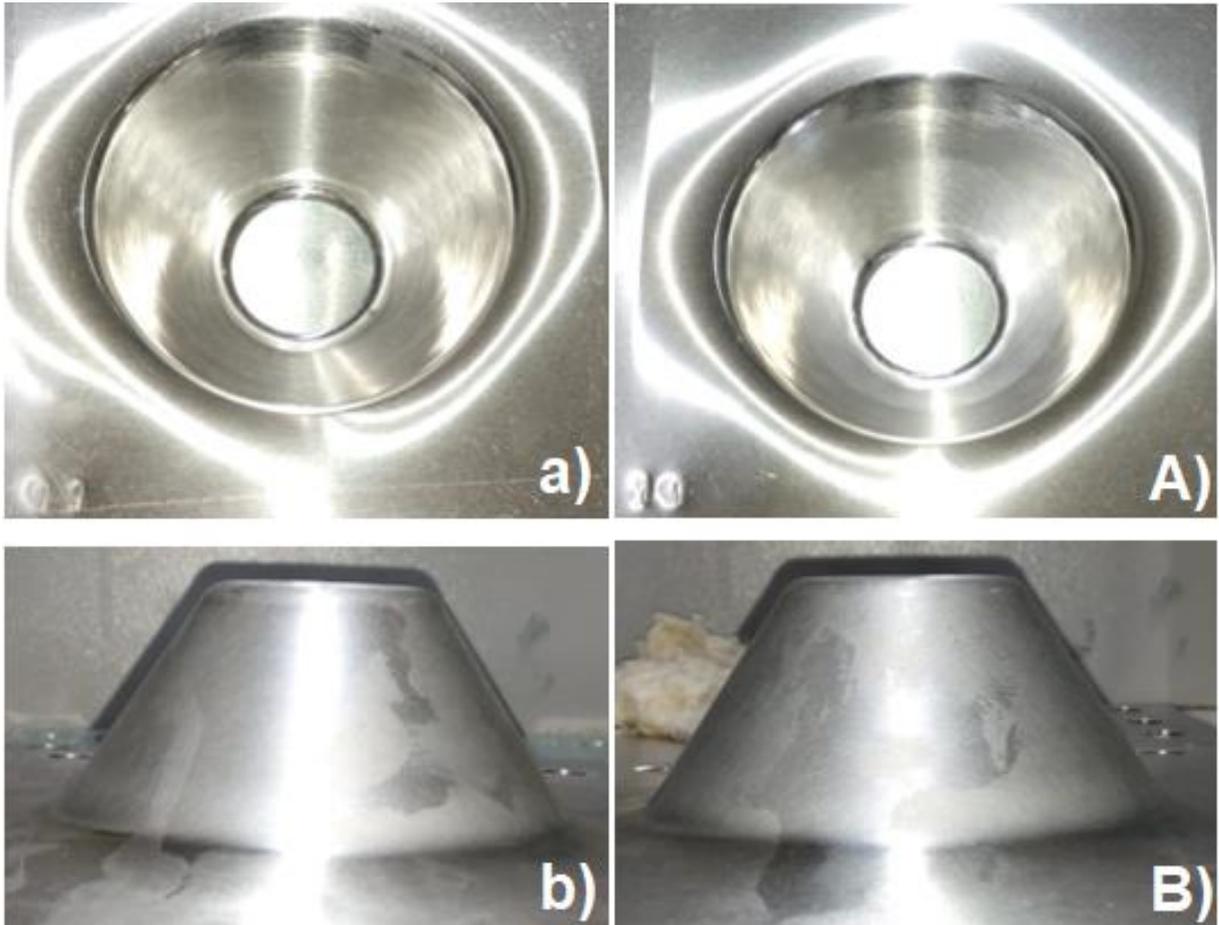


Figura 39 - Planejamento fatorial. Testes 9 e 10. a) e A): vistas superiores e b) e B) vistas laterais dos testes 9 e 10 respectivamente.

Fonte: Autor.

No teste 10, é possível notar uma diferença na tonalidade da peça da metade até o fundo. Isso se deve à arranhões que possam terem sido causados pelo aderimento de uma partícula à ferramenta.

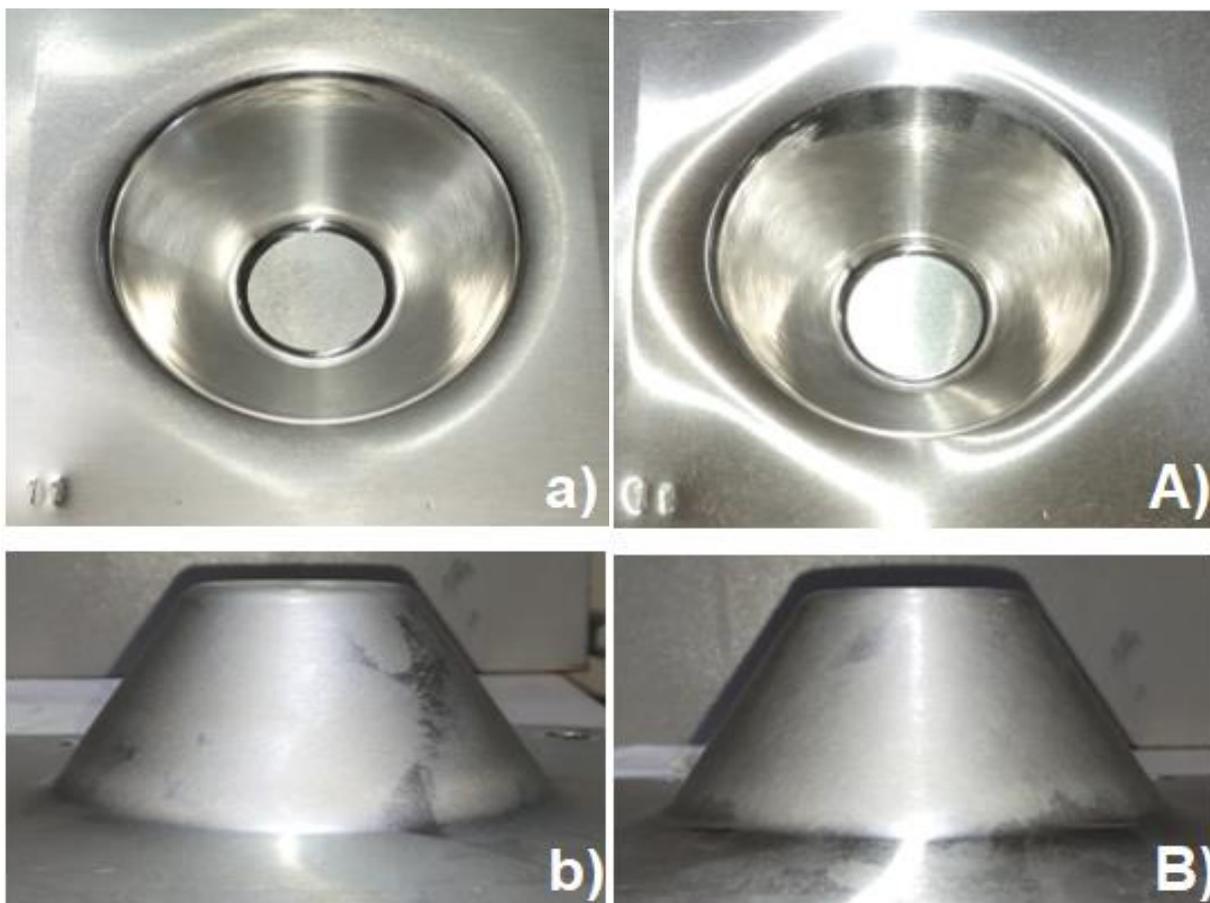


Figura 40 - Planejamento fatorial. Testes 11 e 12. a) e A): vistas superiores e b) e B) vistas laterais dos testes 5 e 6 respectivamente.

Fonte: Autor.

Os testes obtiveram êxito em sua realização, concluído a rotina de testes elaborada no planejamento fatorial.

A Fig. (41) a seguir mostra todos os testes realizados no planejamento.



Figura 41 - Todos os testes do Planejamento fatorial.

Fonte: Autor.

Após a conclusão de todos os testes, foram realizadas as medições das rugosidades Ra (rugosidade média) em cada peça, da mesma forma como na análise da rugosidade feita anteriormente, e então foi retirada a média desses valores. Os resultados estão apresentados na Tab. (12) a seguir.

Tabela 12 - Rugosidades medidas no planejamento fatorial.

Nº	1	2	3*	4	5	6	7	8	9	10**	11	12
Teste												
Ra [µm]	0,409	0,571	0,484	0,420	0,501	0,505	0,405	0,468	0,476	0,573	0,516	0,472
//	0,575	0,499	0,552	0,629	0,648	0,575	0,377	0,457	0,631	0,548	0,631	0,617
//	0,609	0,583	0,601	0,565	0,445	0,609	0,379	0,415	0,562	0,688	0,485	0,632

//	0,440	0,426	0,565	0,410	0,531	0,467	0,502	0,521	0,579	0,527	0,421	0,450
//	0,650	0,572	0,618	0,442	0,544	0,546	0,492	0,501	0,533	0,643	0,646	0,521
//	0,580	0,423	0,593	0,519	0,549	0,599	0,435	0,511	0,545	0,699	0,601	0,576
//	0,411	0,431	0,470	0,315	0,597	0,562	0,330	0,315	0,423	0,613	0,639	0,455
//	0,452	0,368	0,579	0,407	0,616	0,695	0,452	0,403	0,591	0,652	0,488	0,539
//	0,470	0,372	0,458	0,499	0,611	0,598	0,301	0,375	0,543	0,572	0,548	0,478
//	0,298	0,353	0,509	0,409	0,489	0,618	0,452	0,429	0,504	0,540	0,622	0,458
//	0,508	0,470	0,621	0,354	0,633	0,448	0,496	0,448	0,574	0,592	0,523	0,513
//	0,409	0,519	0,576	0,389	0,617	0,550	0,496	0,488	0,559	0,657	0,590	0,402
Média:	<b>0,484</b>	<b>0,466</b>	<b>0,552</b>	<b>0,447</b>	<b>0,565</b>	<b>0,564</b>	<b>0,426</b>	<b>0,444</b>	<b>0,543</b>	<b>0,609</b>	<b>0,559</b>	<b>0,509</b>
Desvio Padrão	<b>0,103</b>	<b>0,083</b>	<b>0,058</b>	<b>0,090</b>	<b>0,065</b>	<b>0,068</b>	<b>0,068</b>	<b>0,061</b>	<b>0,055</b>	<b>0,059</b>	<b>0,073</b>	<b>0,071</b>
Tempo de teste:	47 min	29 min	18 min	29 min	18 min	31 min	17 min	47 min	18 min	29 min	29 min	31 min

Fonte: Autor.

\*: Teste apresentou uma leve imperfeição na parede da geometria, mas não ocorreu o rompimento, possivelmente por alguma impureza que estava no óleo lubrificante.

\*\* : Teste apresentou uma diferença visível no seu acabamento superficial a partir da metade da geometria devido aderimento de alguma partícula à ferramenta, deixando a presa com o aspecto de 'arranhada'.

Após obtidos os valores médios da rugosidade Ra de cada superfície de cada teste, os dados foram tratados para obtenção dos **efeitos principais**, que avalia o efeito de cada fator com seus níveis, em separado, na influência na resposta de saída (rugosidade) e também foram calculados os **efeitos das interações**, que avalia como cada combinação dos fatores e seus níveis interferem na resposta.

#### 4.3.1. Efeito Principal

O efeito principal faz a média das respostas para um fator, passo ou avanço, de acordo com um dos seus níveis, nesse caso estudado sendo 0,3(-) ou 0,5(+) para o passo ou 900(-) ou 1500(+) para o avanço. Para uma breve exemplificação, utilizando as informações apresentadas na Tab. (11), o efeito principal para o passo de menor nível (0,3 mm) seria calculado de acordo com a Eq. (6) abaixo.

$$Efeito\ principal = \frac{Ra\ 1^o\ teste + Ra\ 2^o\ teste + Ra\ 4^o\ teste + Ra\ 7^o\ teste + Ra\ 8^o\ teste}{\text{"nº de testes com o passo 0,3"}} \quad (6)$$

O mesmo é aplicado para o Passo de 0,5 mm e para os níveis de Avanço também, basta verificar quais foram os testes que tiveram como parâmetro o nível do fator de interesse. Os cálculos resultaram em quatro valores médios, sendo um para cada nível de cada fator.

Após realizados os cálculos para obtenção dos efeitos principais, foram confeccionados os gráficos presentes na Fig. (42) e na Fig. (43) a seguir.

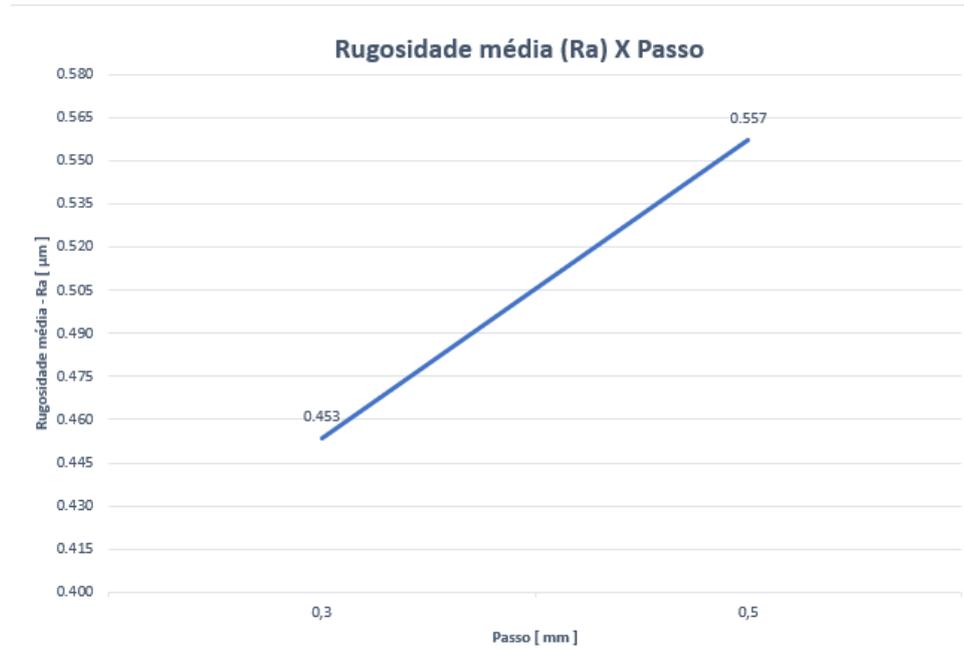


Figura 42 - Gráfico do Efeito Principal do Passo.

Fonte: Autor.

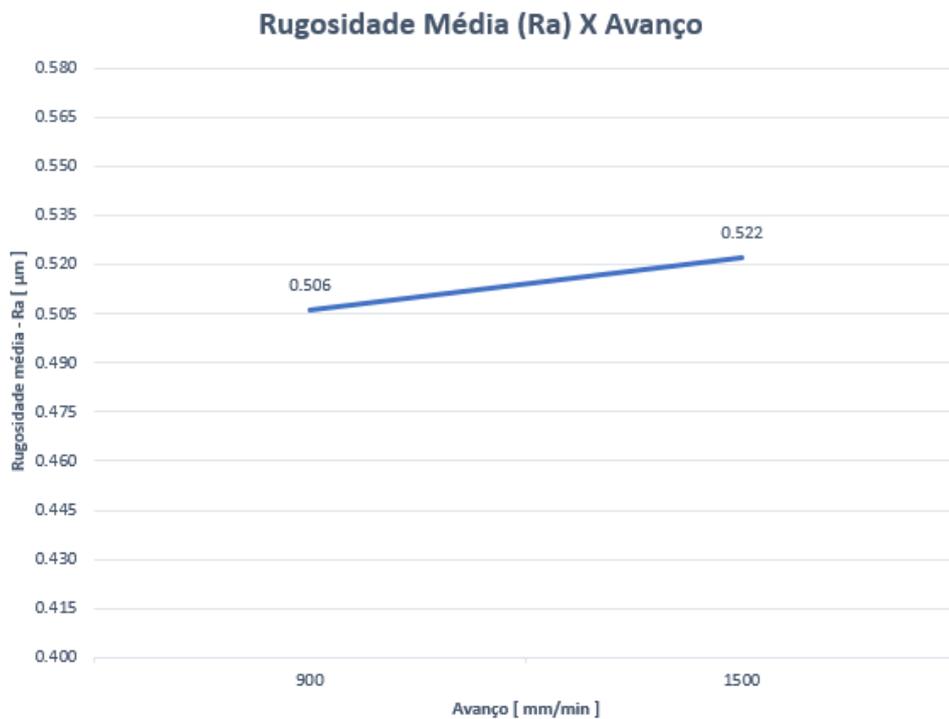


Figura 43 - Gráfico do Efeito Principal do Avanço.

Fonte: Autor.

Pela análise dos gráficos apresentados, é possível verificar, claramente, que o passo apresenta uma variação mais relevante do que o avanço, onde, no passo, a

variação do Ra é de 0,104  $\mu\text{m}$ , enquanto no avanço é de 0,016  $\mu\text{m}$ , o que indica que, nessa primeira análise, o passo se apresentou mais influente em relação ao avanço, contudo, também foram feitas as análises dos Efeitos de Interação.

#### 4.3.2. Efeito de Interação

O efeito de interações faz a média das respostas obtidas, mas diferente do efeito principal, ele considera os dois fatores e a combinação entre seus níveis e todas as possíveis combinações entre eles. Para uma nova exemplificação, o cálculo do efeito de interações para o passo, em seu nível mínimo de 0,3 mm, e para o avanço, também em seu nível mínimo de 900 rpm, utilizando as informações apresentadas na Tab. (11). A formulação para esse caso está representada na Eq. (7) a seguir.

$$\text{Efeito interações} = \frac{\text{Ra } 1^{\circ} \text{ teste} + \text{Ra } 7^{\circ} \text{ teste} + \text{Ra } 8^{\circ} \text{ teste}}{(\text{n}^{\circ} \text{ de testes com essa combinação})} \quad (7)$$

Para o cálculo dos demais efeitos, aplica-se a mesma lógica da Eq. (7) variando apenas os resultados de acordo com os níveis dos fatores analisados.

Após realizados os cálculos, os resultados foram dispostos nos gráficos presentes na Fig. (44) e Fig. (45) a seguir.

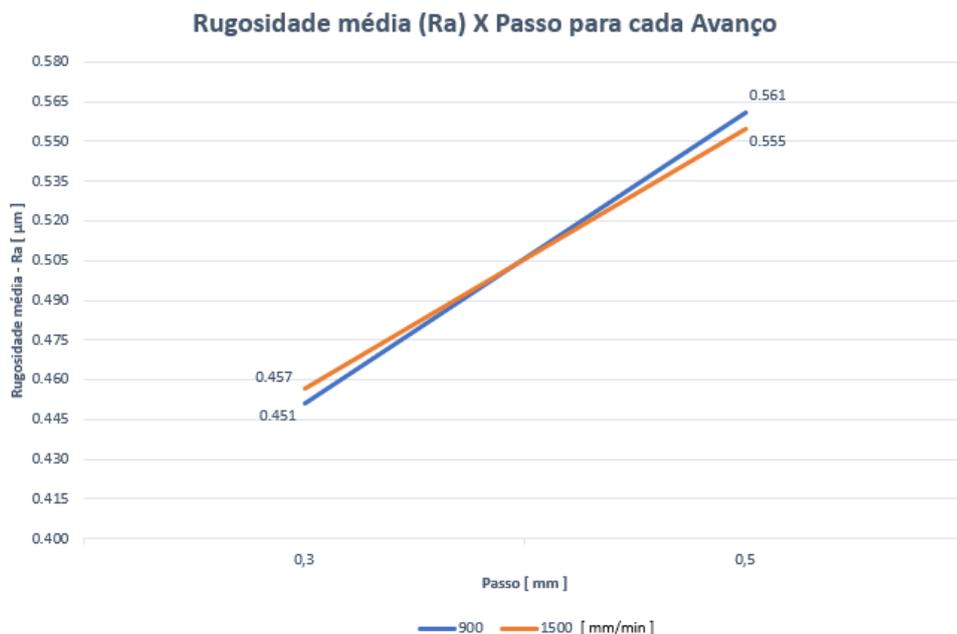


Figura 44 - Gráfico de interações pela perspectiva do Passo.

Fonte: Autor.

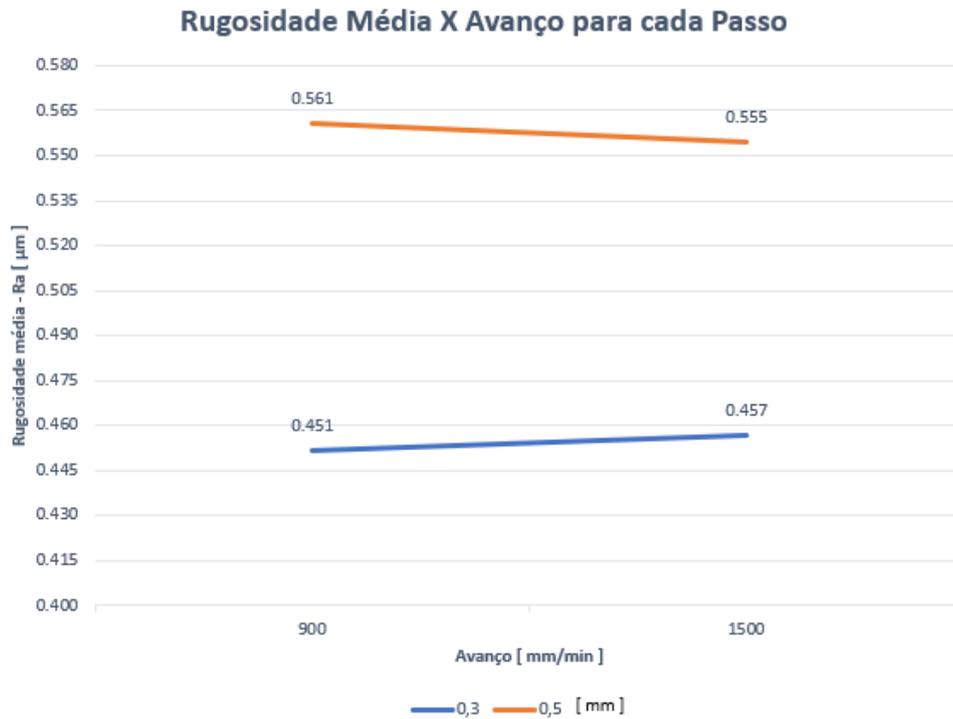


Figura 45 - Gráfico de interações pela perspectiva do Avanço.

Fonte: Autor.

Além dos gráficos de linhas apresentados, foram elaboradas duas superfícies de respostas para compreensão da influência da combinação dos fatores estudados. As superfícies podem ser vistas na Fig. (46) e na Fig. (47) a seguir.

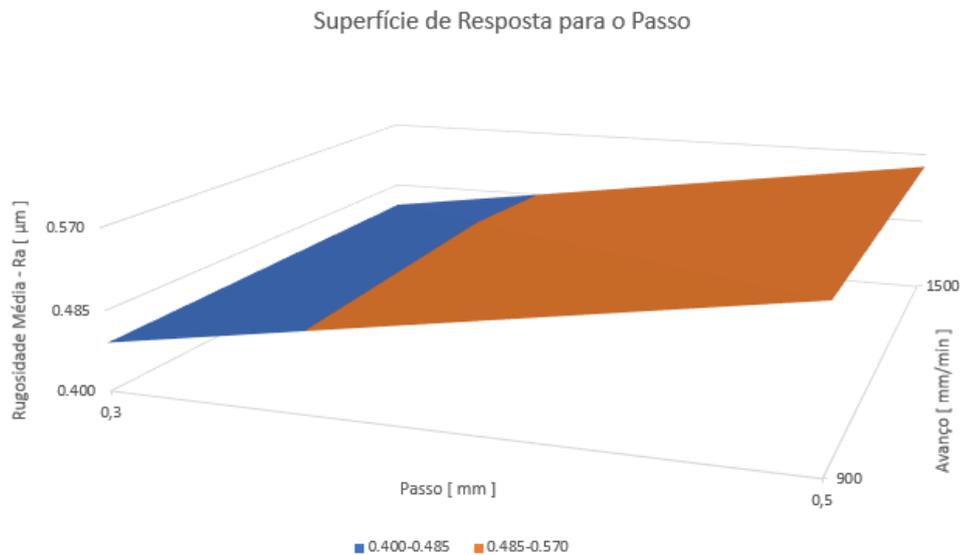


Figura 46 - Superfície de resposta na perspectiva do Passo.

Fonte: Autor.



Figura 47 - Superfície de resposta sob a perspectiva do Avanço.

Fonte: Autor.

#### 4.3.2.1. Regressão linear.

Utilizando os dados coletados nas medições de rugosidade, foi montada uma tabela no *software Minitab 17* considerando os diferentes valores de Passo, Avanço e Rugosidade média (Ra) obtidos em cada medição para cada teste. Essa tabela foi utilizada para realização de uma regressão linear, que tem como objetivo demonstrar se existe algum fator 'R', dentre os considerados, que apresenta influência significativa na variável utilizada como resposta. O software além de demonstrar o parâmetro de maior influência para a respostas selecionada, ele elabora uma equação que descreve a respostas, neste caso a rugosidade, em função dos parâmetros investigados (Avanço e Passo).

Os resultados obtidos pela regressão linear estão presentes nas Figs. (48) e (49) a seguir, e o modelo de equação é apresentado na Eq. (8).

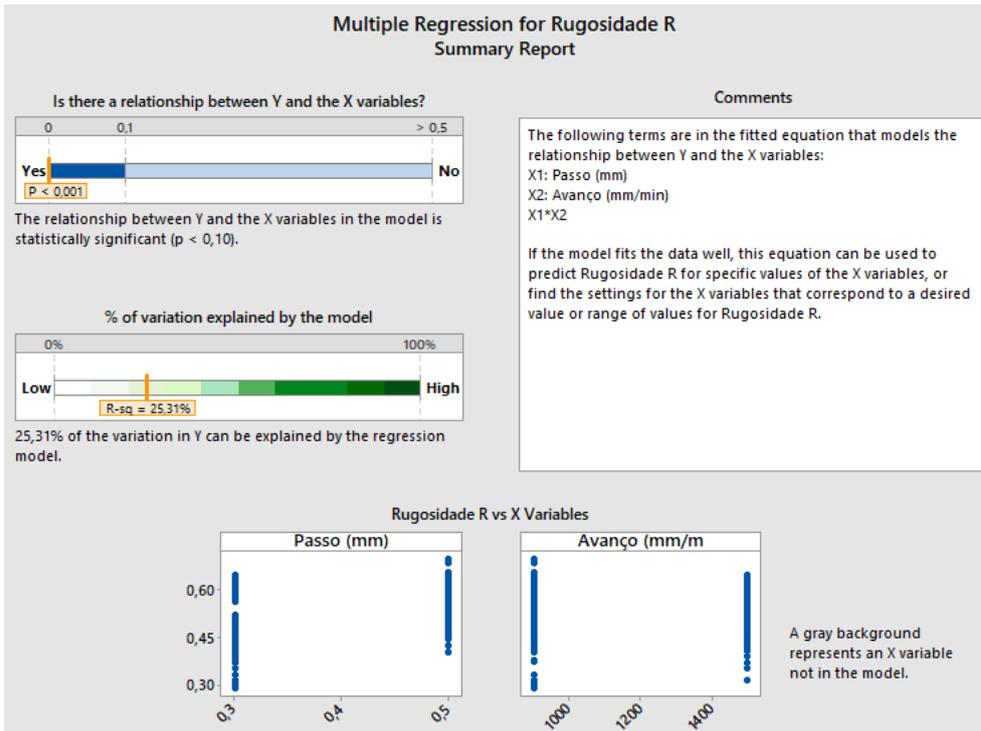


Figura 48 - Regressão linear: estatística de influência dos parâmetros na resposta.

Fonte: Autor.

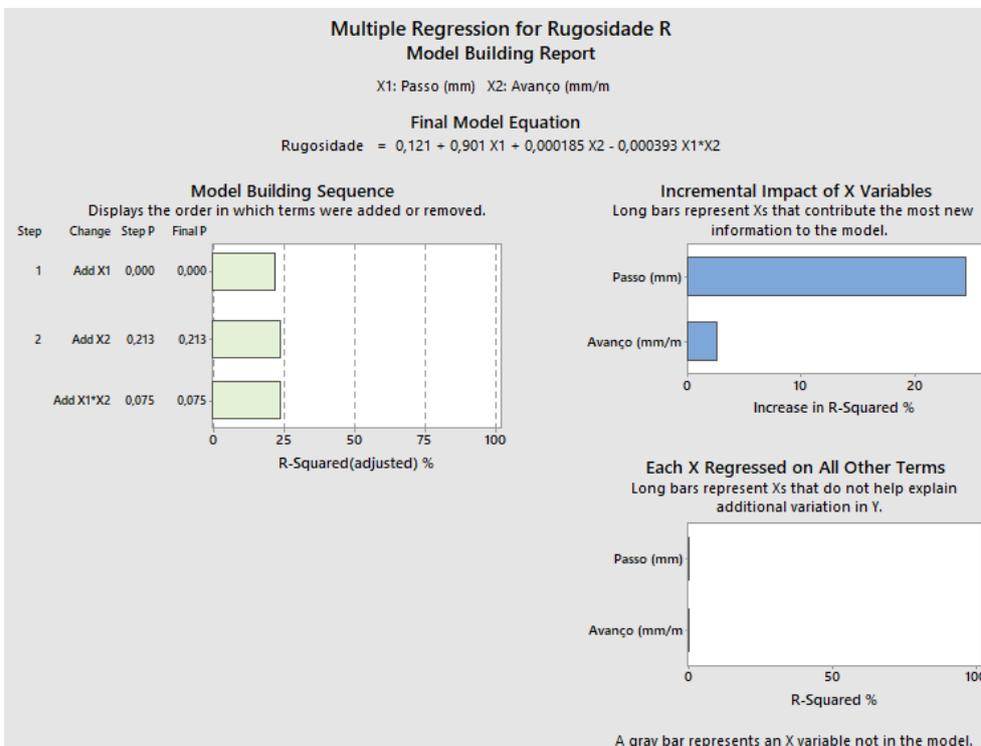


Figura 49 - Regressão linear. Análise de influência de cada parâmetro e demonstração da equação de respostas.

Fonte: Autor.

$$Rugosidade = 0.121 + (0.901 * X1) + (0.000185 * X2) - (0.000393 * X1 * X2) \quad (8)$$

Onde:

X1 = Passo (mm);

X2 = Avanço (mm/min).

Com base na análise dos gráficos e das superfícies de resposta e da regressão linear, conclui-se alguns pontos interessantes.

Pela análise dos gráficos apresentados na Figs. (41) e (42), a inclinação da reta para a variação do passo, mostra uma variação muito mais significativa do que quando comparada a variação do avanço, e essas mesmas análises se repetem quando realizada a análise das superfícies de respostas nas Figs. (43) e (44).

Outro ponto interessante apresentado pelo gráfico na Fig. (44), é que, para um passo menor, o aumento do avanço implica no aumento da rugosidade da superfície, o quê, no caso de um passo maior, é benéfico para a redução da rugosidade da superfície.

Analisando todos os gráficos e os resultados obtidos pela regressão linear, ficou evidente que a variação do passo é mais influente na rugosidade superficial da peça se comparada com o avanço da ferramenta.

## 5. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

A Fig. (50) ilustra o cronograma de atividades do trabalho.

Atividades	Período									
	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho
Pesquisa sobre o tema	■	■	■							
Confeção da parte escrita		■	■	■						
Formatação do trabalho			■	■						
Apresentação do TCC1					■					
Definição da geometria			■	■						
Obteção da materia prima	■									
Obtenção da(s) ferramenta(s)		■			■					
Obtenção do prensa chapas		■		■						
Ensaio e testes					■	■	■	■		
Avaliação dos resultados						■		■		
Modificações no documento								■	■	■
Apresentação do TCC2										■

Figura 50 - Cronograma de atividades.

Fonte: Autor.

## 6. CONCLUSÕES

- O método de estampagem incremental de ponto simples (SPIF) é eficaz e se mostrou viável e satisfatório, pois utilizando um dispositivo prensa chapas, uma ferramenta semiesférica e uma máquina CNC de três eixos, já é passível de sua aplicação, e apresenta resultados dentro do esperado sendo similares ao processo de punção e matriz, embora a definição dos parâmetros, o tipo de geometria, espessura de chapa e o tempo de execução, sejam pontos limitantes para a aplicação do processo.
- A utilização do alumínio se mostrou uma ótima escolha de matéria prima, pois possui um ampla área de aplicação e grande disponibilidade no mercado, é um material reutilizável e apresenta boa estampabilidade e um bom acabamento superficial utilizando essa técnica, embora ainda possa ser inferior ao método de punção e matriz, principalmente devido ao grande número de parâmetros envolvidos no processo que são capazes de influenciar no acabamento.
- O ângulo máximo de parede obtido nos testes foi de  $56^{\circ},5'$  devido aos parâmetros considerados no testes (características da ferramenta, rotação e avanço), embora que teoricamente, esse valor possa ser ultrapassado alterando a espessura da chapa, características da ferramenta, passo, avanço, rotação, utilização da técnica de variação de ângulo ao longo da estampagem e até a variação da temperatura da chapa.
- As análises de rugosidade indicaram que o aumento do ângulo de parede, é benéfico à melhora da rugosidade da superfície, melhorando o acabamento.
- As análises obtidas pelo planejamento fatorial  $2^2$ , utilizando como fatores o passo e o avanço, mostraram que a variação do passo é muito mais influente na superfície da peça do que a variação do avanço, indicando que se trabalha melhor a superfície com Passos menores, porém o tempo de execução aumenta consideravelmente nesses casos. Também pode se verificar que, para o valor de passo maior, o aumento do avanço foi benéfico se comparado com o valor de passo menor.

- Utilizando as informações de todas as análises, conclui-se que todos os parâmetros que interferem diretamente no deslocamento vertical da chapa, possuem grande influência na rugosidade da mesma, e por consequência em seu acabamento, como pode ser visto quando se vario o passo e o ângulo de parede.

## 7. BIBLIOGRAFIA

ABAL. (07 de dezembro de 2022). Fonte: Abal:<https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>

ABNT, NBR. 6152. **Materiais metálicos–Ensaio de tração à temperatura ambiente.** Rio de Janeiro, 2002.

ALLWOOD, J.; JACKSON, K. **An introduction to incremental sheet forming in Cambridge.** In: CMI workshop on sandwich sheets, 21st June. 2005.

ATTANASIO, A.; CERETTI, E.; GIARDINI, C.; MAZZONI, L. **Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization.** *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 197, n. 1, p. 59–67, 2008.

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

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

CALLISTER JR, W. D., - **Ciência e Engenharia dos Materiais uma Introdução**, 5º ed, LTC editora. Janeiro 1999.

CASTELAN, J. **Utilização das tecnologias CAD/CAM para estampagem incremental do alumínio série 1000.** 2007. 193p. Dissertação (Mestrado em Processo de Fabricação) – Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CASTELAN, J. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para implicação em implante craniano.** 2010. 117p. Tese (Doutorado em Processo de Fabricação) – Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

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

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

DAGNALL, H. **“Exploring Surface Texture”**, 2ª edition, Rank Taylor Hobson Limited, England, 1986.

DALEFFE, A. **Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro**.2008.

DURANTE, M.; FORMISANO, A.; LANGELLA, A.; MINUTOLO, F. M. C. **The influence of tool rotation on an incremental forming process**. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 209, n. 9, p. 4621–4626, 2009.

ETC MÁQUINAS. (15 de dezembro de 2022). Fonte: ETC Máquinas: <https://etecmaquinas.com/produtos/centro-de-usinagem-romi-d600-4/>

FILHO, OLMEDE C. S., **Caracterizações de Propriedades Microestruturais e Mecânicas de Ligas AA 1100 e AA 5052 Processadas pela Técnica de Laminação Acumulativa (“Accumulated Roll Bonding” – ARB)**. Universidade de São Paulo. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalurgia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FURLANETTI, M. **Estudo do comportamento das deformações em flanges obtidos pelo processo de estampagem incremental através de elementos finitos e projeto de um suporte modular**. Universidade de São Paulo. 2014. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos Departamento de Engenharia Mecânica – EESC – USP, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2014.

FRITZEN, D.; DALEFFE, A.; SCHAEFFER, L.; CASTELAN, J. **ANALISE DOS RESULTADOS DA CHAPA DE TITÂNIO Ti-CP GRAU 2 EM ESTAMPAGEM INCREMENTAL NA MODALIDADE SPIF<sup>1</sup>**. 2011.Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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

IMPÉRIO DOS METAIS. (07 de dezembro de 2022). Fonte: Império dos metais: <https://www.imperiodosmetais.com.br/ficha-tecnica>

JESWIET J., MICARI F., HIRT G., BRAMLEY A., DUFLOU J., ALLWOOD J. **Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal**. CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 54, pp. 88-114 2005.

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

KITZAWA, K.; NAKAJIMA, A. **Cylindrical incremental drawing of sheet metals by CNC incremental forming process**, 6th ITCP, 1999.

KUNERT J., KLEINER M., EWERS R., HENKENJOHANN N., AUER C. **Optimisation of the shear forming process by means of multivariate statistical methods**, Relatório Interno, Universidade de Dortmund. 2005.

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

LESZAK, Edward. **Apparatus and process for incremental dieless forming**. U.S. Patent n. 3,342,051, 19 set. 1967.

MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., SILVA, R. T. (2009). **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo. Editora Blucher.

MATSUBARA, S. **Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical tool**. Journal of the JSTP, vol 35, pp. 1311-1316, 1994.

MINUTOLO, F. C., DURANTE M., FORMISANO A. LANGELA A. **Evaluation of the maximum slope angles of simple geometries carried out by incremental forming process**. Department of Materials and Production Engineering. University of Nales Federico II, Piazzale Tecchio 80, 80125 Naples, Italy. Journal of Materials Processing Technology 194, 2007:145 -150.

Neto, B. d., Scarmino, I. S., & Bruns, R. E. (2001). **COMO FAZER EXPERIMENTOS Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas, São Paulo, Brasil : Editora da Unicamp.

RODRIGUES, J e MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica**. Vol. 1 e 2 [S.1], Escolar Editora, 2005.

ROMI. (15 de dezembro de 2022). Fonte: Romi: [www.romi.com/produtos/linha-romi-d-nova-geracao/](http://www.romi.com/produtos/linha-romi-d-nova-geracao/)

SENA, JOSÉ L. V. **Estampagem Incremental: um novo conceito de produção**. 2009. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Aveiro, Portugal, 2009.

SCHAEFFER, L. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre. 267p. Bibliografia: p 122.1999.

SILVA, P. J. **ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES: UMA ANÁLISE DE CONFORMABILIDADE BASEADA EM MEDIÇÃO DE FORÇA, DESGASTE DE FERRAMENTA E AQUECIMENTO**. 2017. 274p. Tese (Doutorado em Sistemas Mecatrônicos) - Universidade de Brasília: Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, 2017.

SKJØDT, M., BAY, N., & LENAU, T. A. **Rapid Prototyping by Single Point Incremental Forming of Sheet Metal**, 2008.

STRANO, M. **Incremental Forming Processes: Current and Potencial Applications**, SME Technical Paper No MF03-114. 2003.

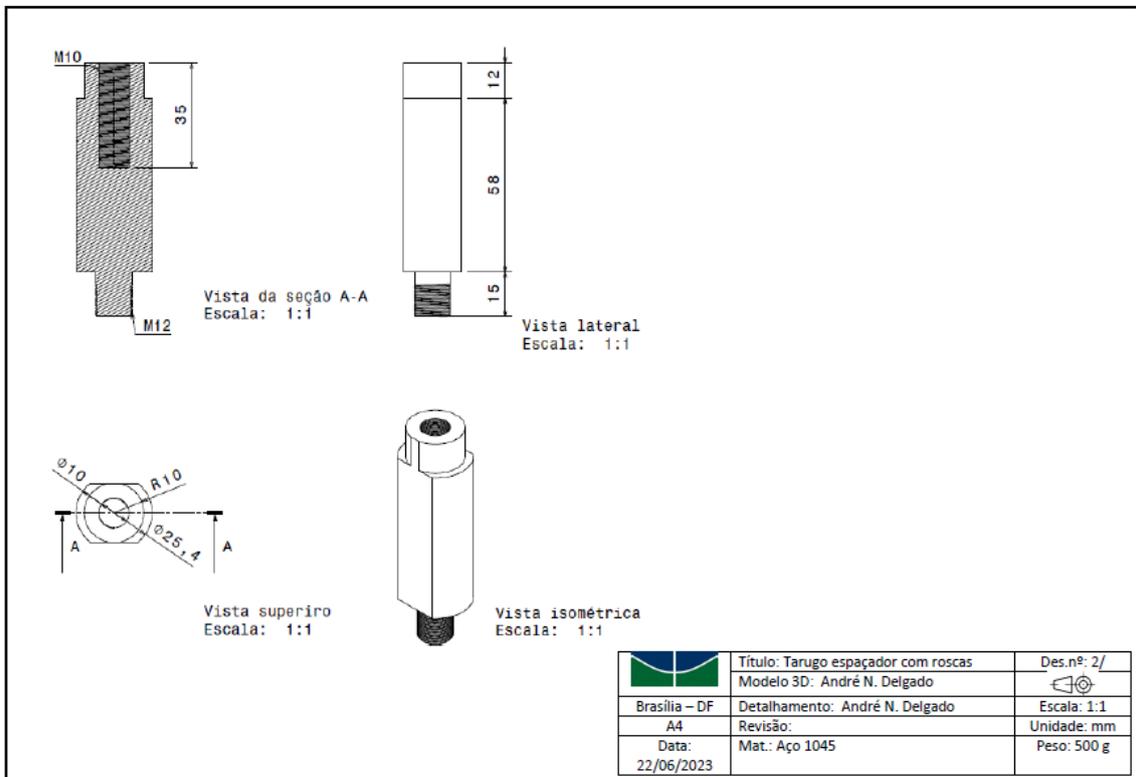
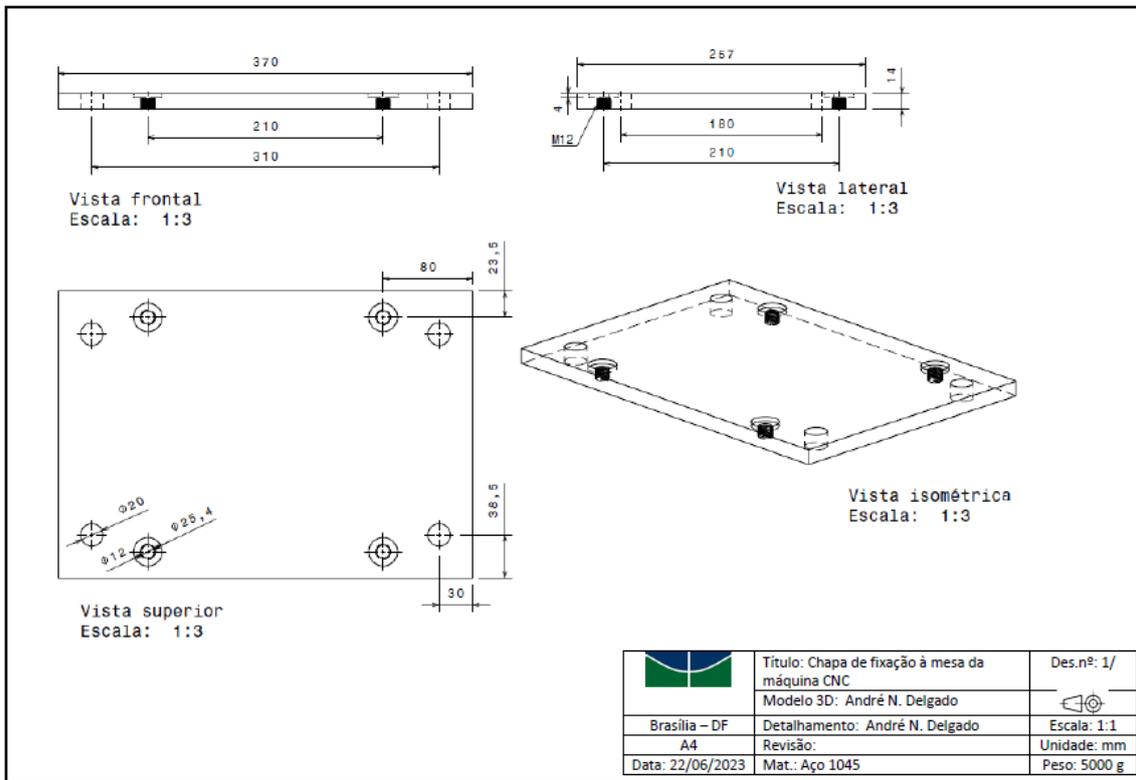
TAVARES, R. I., **ESTUDO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA EM CONJUGADOS LAMINADOS ALUMÍNIO 1100 / ALUMÍNIO 2024**. Instituto Militar de Engenharia. 1984. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia e Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 198

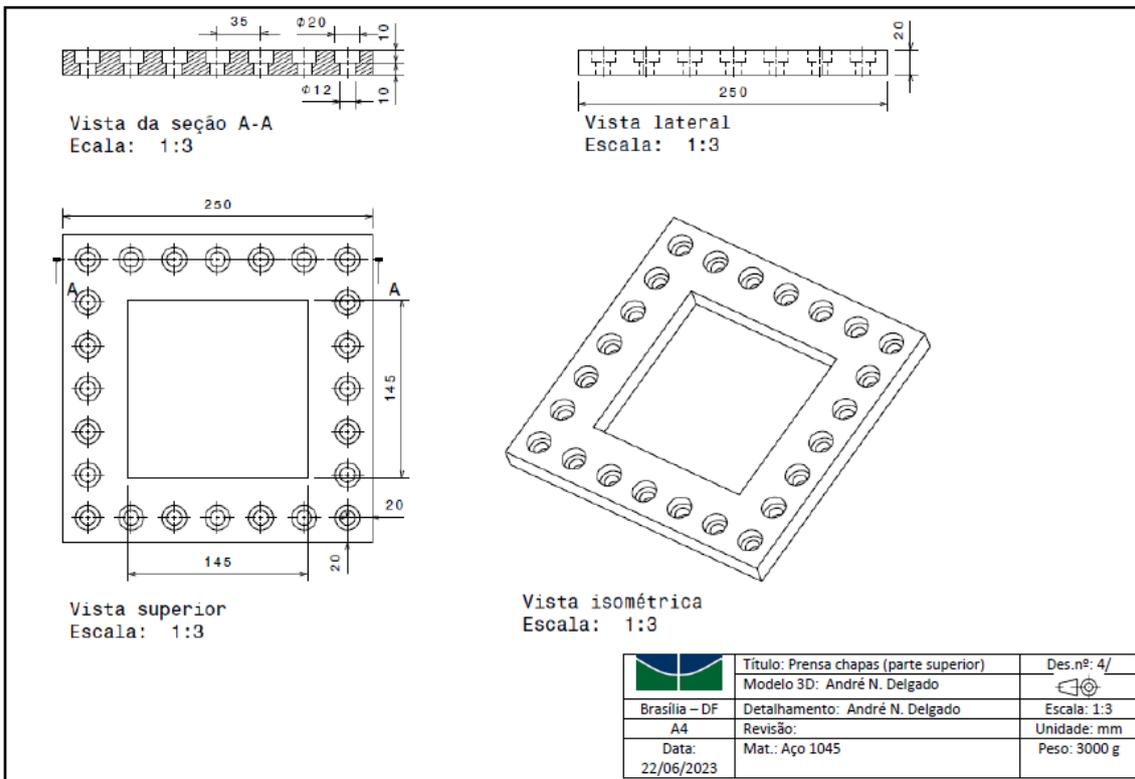
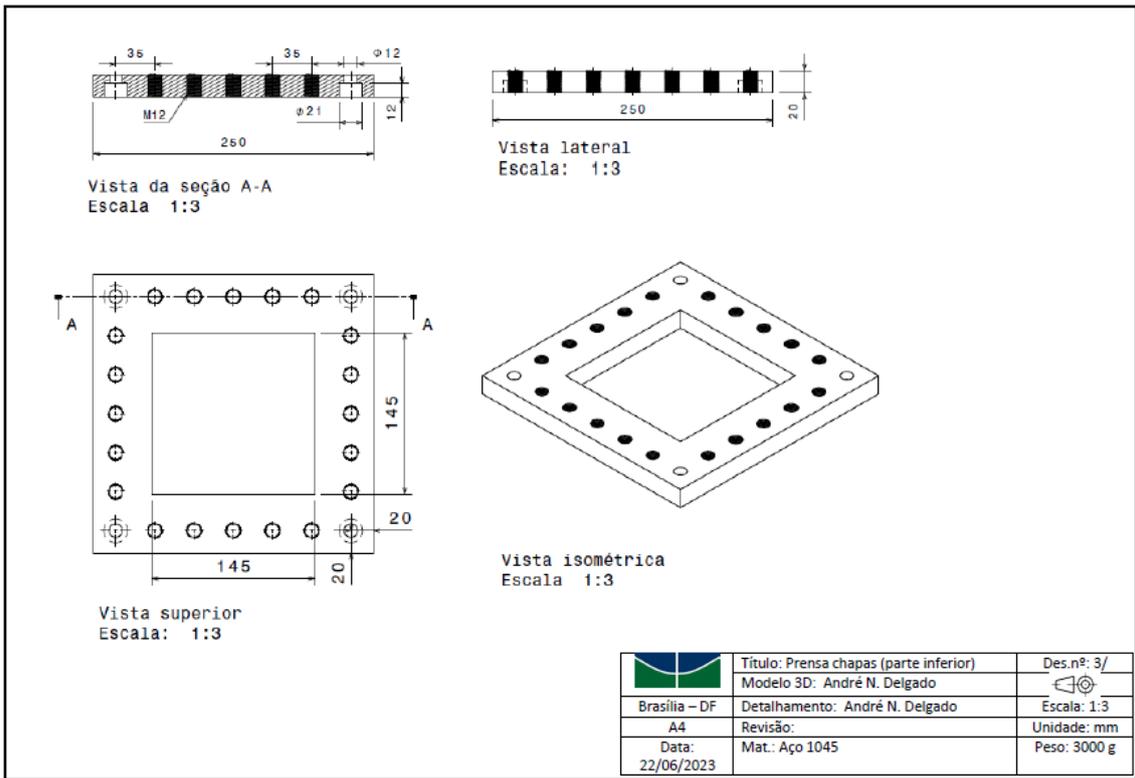
8. ANEXOS

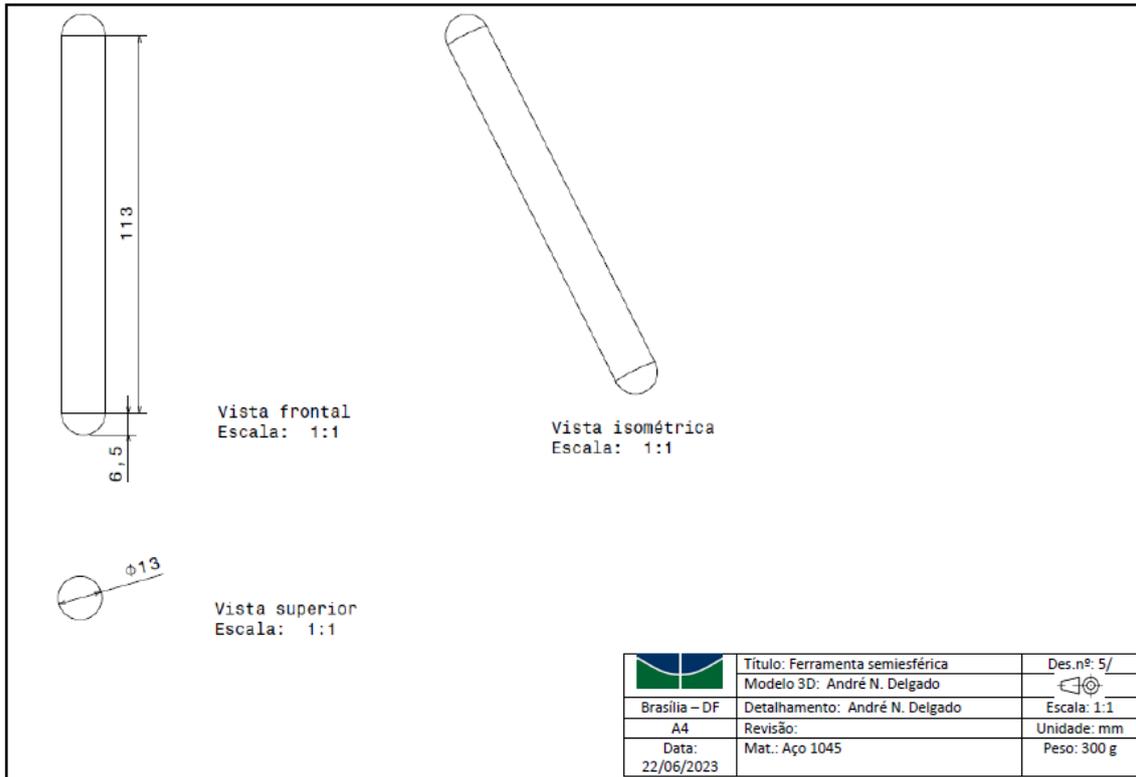
Anexo I

Desenhos Técnicos

Pág.





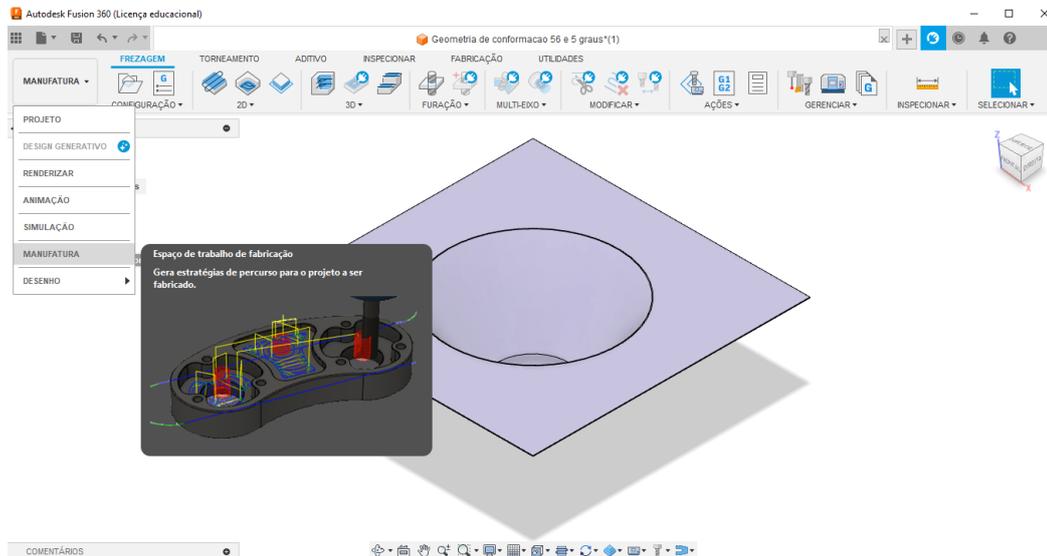


Anexo II

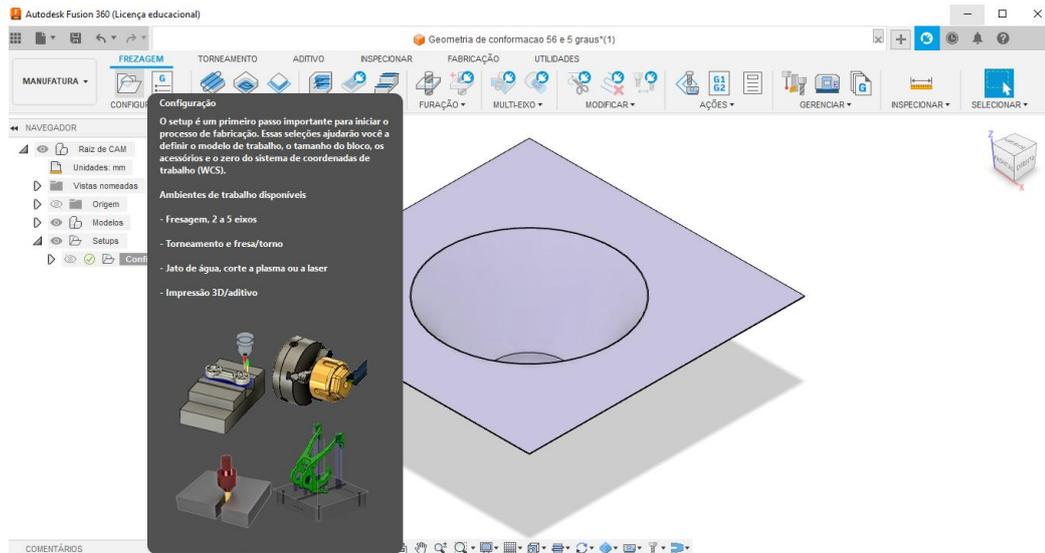
Tutorial do Fusion 360

Pág.

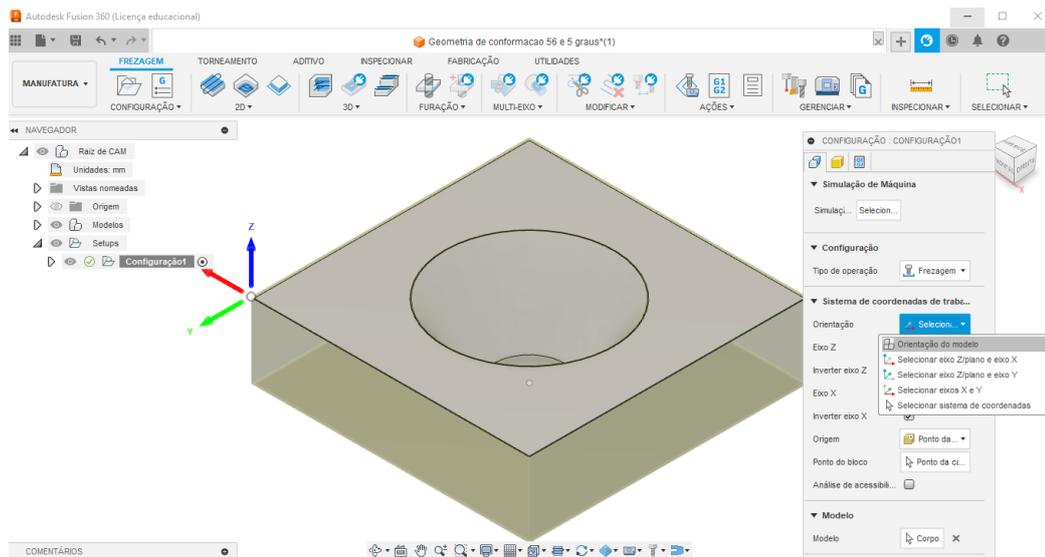
Com a geometria pronta, vá para parte de Manufatura.



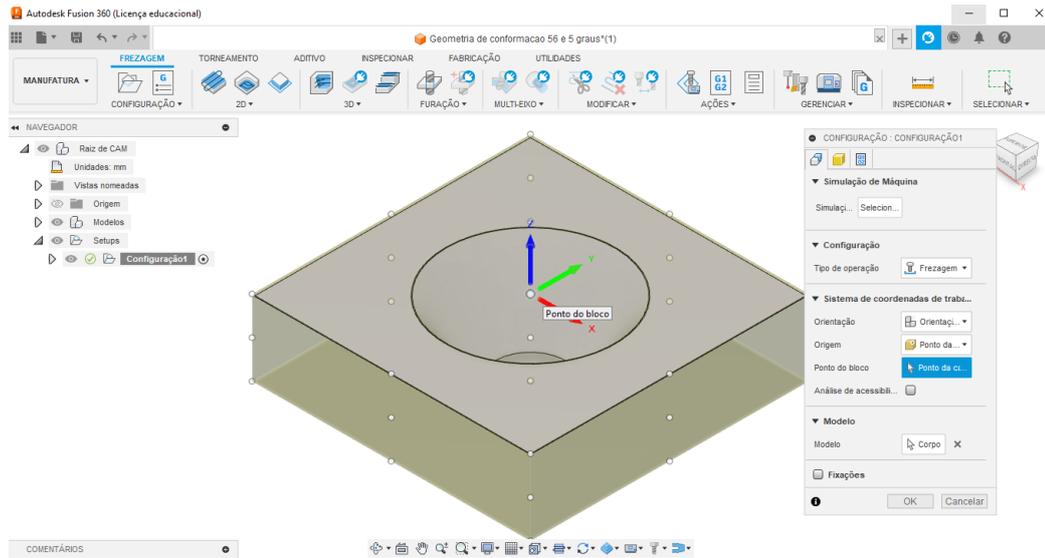
Em seguida, vá na parte de Configurações em Frezagem.



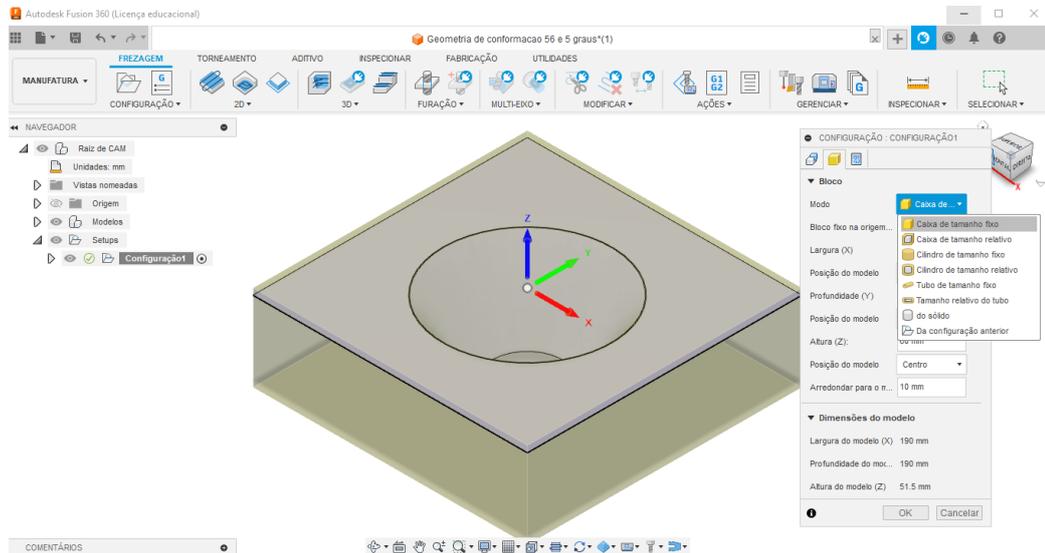
Na janela de configurações, vá em Orientações e selecione Orientação do Modelo, para selecionar a posição da ferramenta.



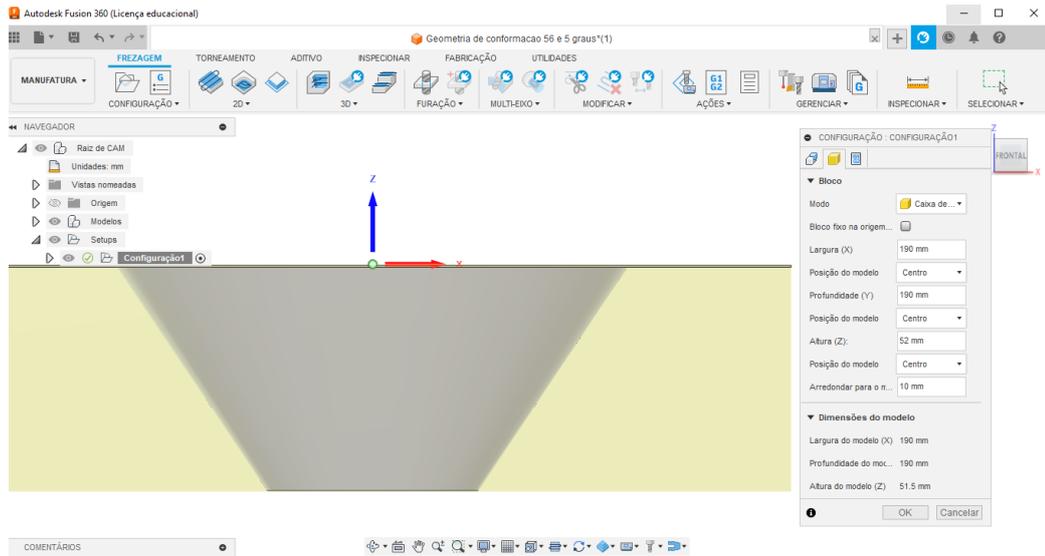
Em seguida, selecione o local de orientação da ferramenta.



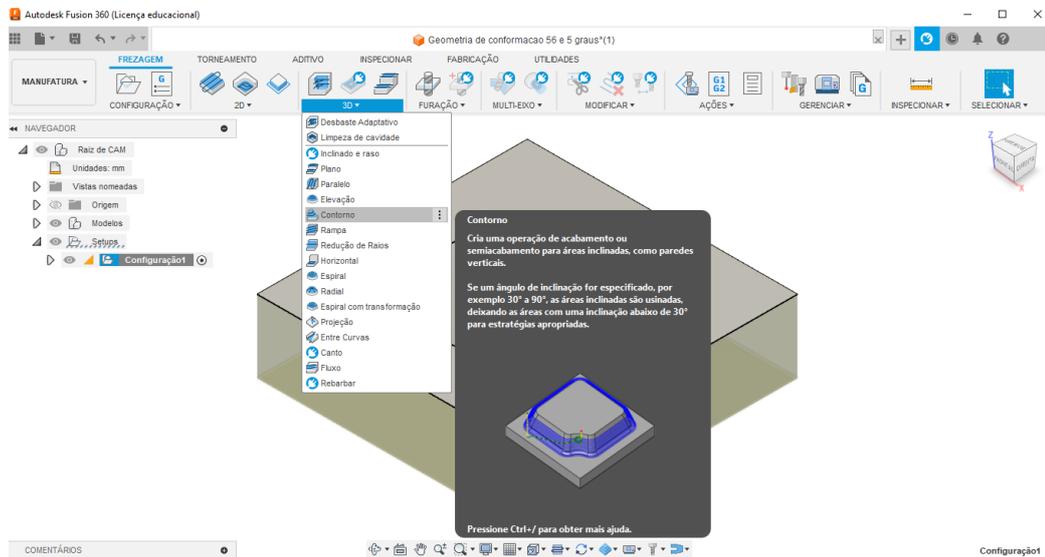
Na segunda aba, vá em Modelo e selecione Caixa de Tamanho Fixo.



E coloque as dimensões totais do modelo de modo que a região sombreada englobe toda geometria.

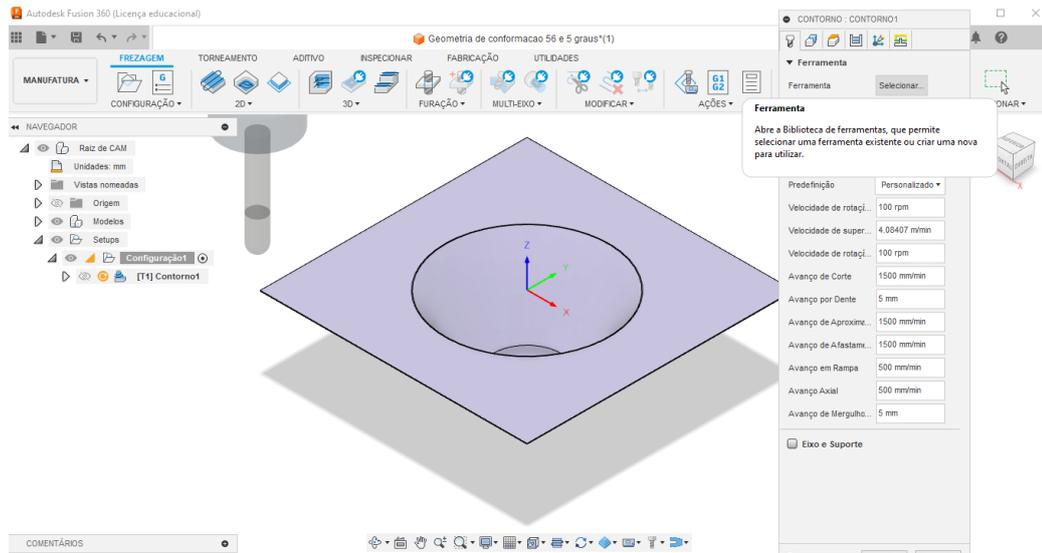


Depois, em 3D, selecione a função Contorno.

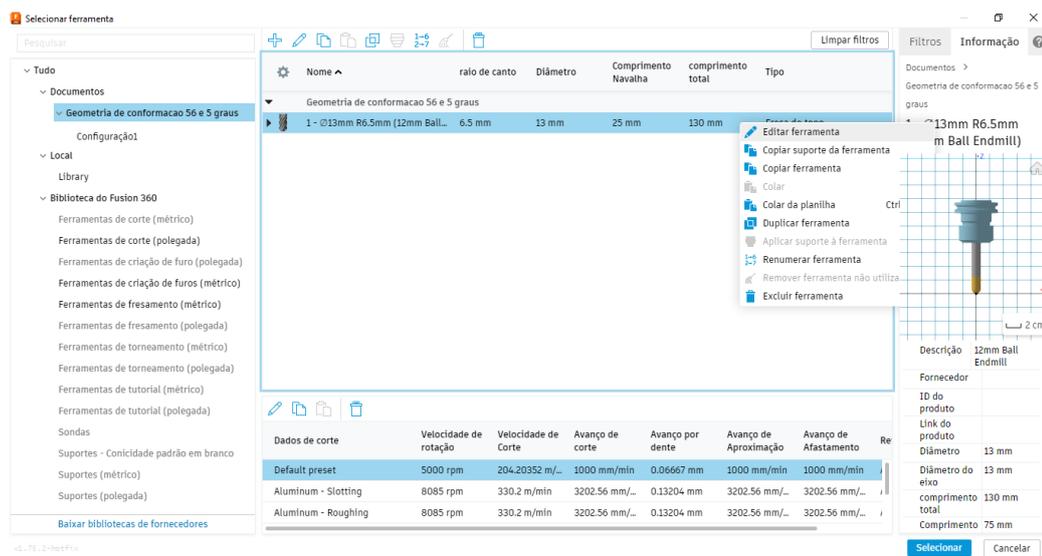


Agora, será definido: Ferramenta, Rotação, Avanço, Área de conformação, Sentido de Rotação, Passo, e Trajetória de movimentação.

Primeiro, define-se a ferramenta como modelo e suas dimensões.

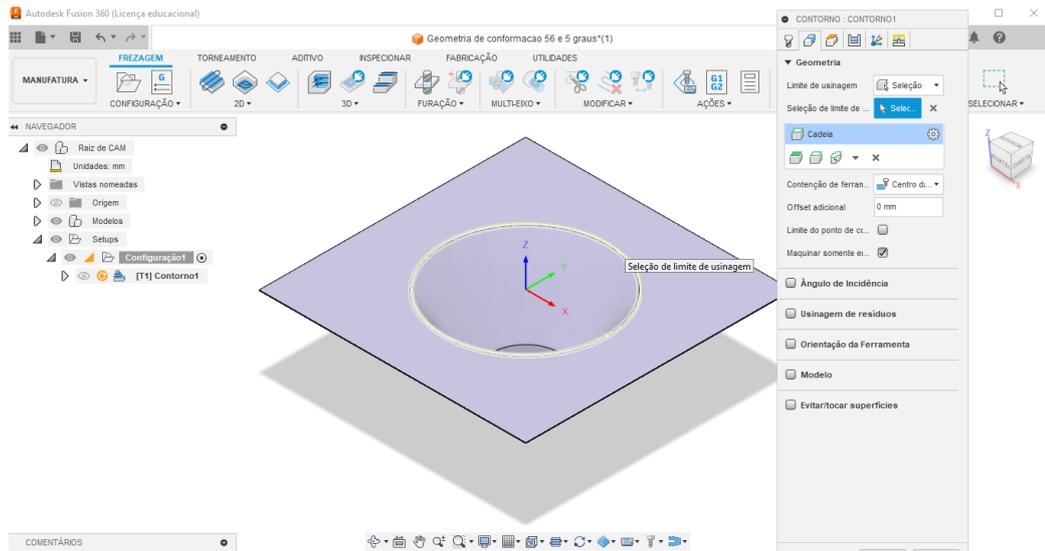


Nesta mesma aba, defina o valor de Velocidade de Rotação e Avanço de Corte de acordo com os parâmetros de teste.



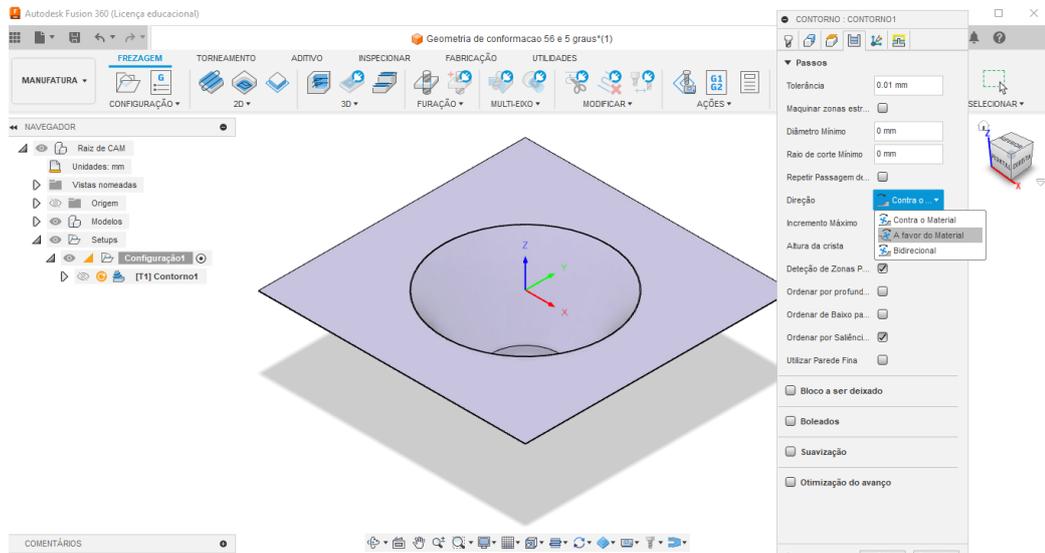
Nesta tela, pode editar as características da ferramenta para ser igual a utilizada nos testes.

Na segunda aba, em Geometria, Limites de Usinagem, escolha Seleção e clique na borda superior da geometria, como mostra a imagem a seguir.

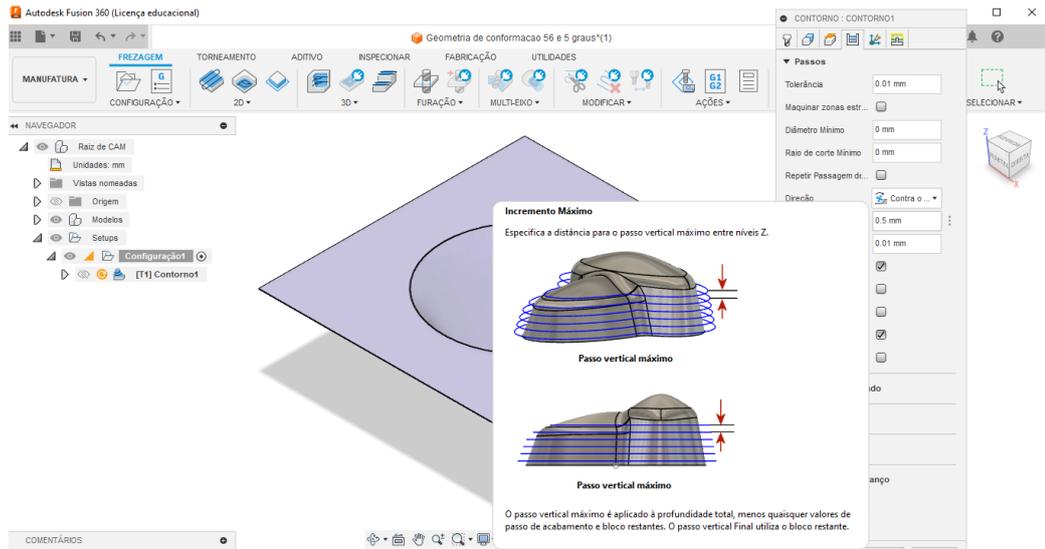


Em baixo, na parte Contenção da Ferramenta, selecione Centro da ferramenta.

Na quarta aba, em Direção, selecione Contra o Material ou A Favor do Material, para definir como será o sentido de rotação, em caso de dúvida, selecione e verifique na simulação o sentido de Avanço da ferramenta.



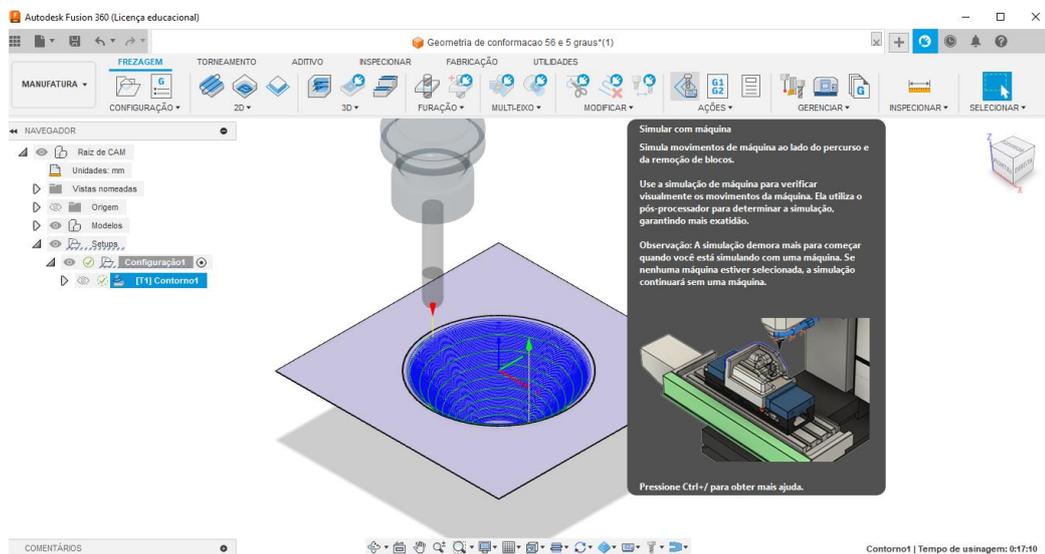
Em Incremento Máximo, selecione o valor máximo de Passo que a trajetória poderá ter. Recomendo usar o valor definido para o Passo como parâmetro de teste.



Na ultima aba, selecione o Tipo de Rampa como Helicoidal, e defina o Passo Vertical Máximo de acordo com os parâmetros de testes, os demais valores ficam ao critério de pesquisador definir.

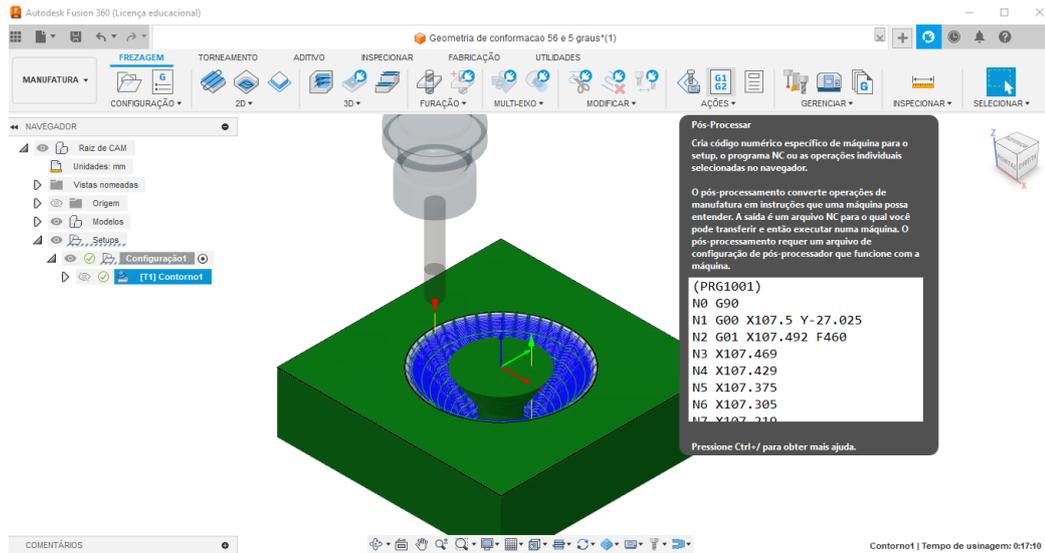
Feita essa parte, clique em Ok no final da caixa e, se tudo estiver certo, aparecerá a trajetória da ferramenta da peça.

Após isso, pode-se verificar fazendo a simulação do processo.

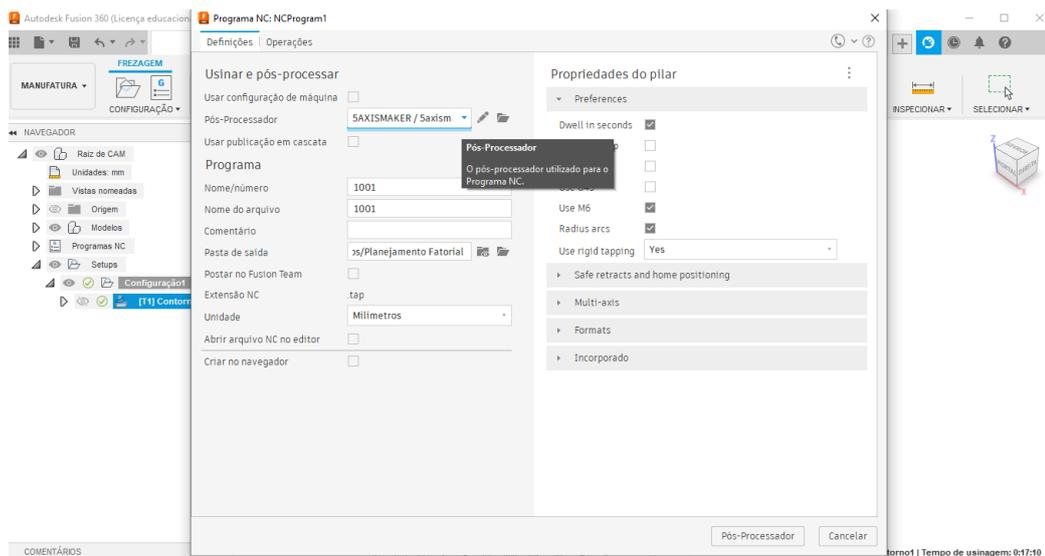


Note que na árvore de ferramentas, a esquerda, a caixinha Contorno1 está com um símbolo verde, isso significa que não há erros no processo.

Após isso, pode-se gerar o código G clicando em G1G2 na parte Ações.



Depois de selecionada, abre uma caixa de diálogo onde são colocados o tipo de máquina CNC, o nome do programa e a pasta de destino. Cuidado com o nome dado ao programa, não usar caracteres especiais.



Clicando em Pós-Processador, o código estará pronto para ser transferido para máquina e executar o teste.