

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia Automotiva

**Estampagem Incremental de Liga de Alumínio
1100 com Ferramentas de Aço-Rápido Sem
Revestimento e Revestida de CrAIN**

Autor: Rafael Ramos Xavier de Castro
Orientador: Prof. Rhander Viana

Brasília, DF
2024



Rafael Ramos Xavier de Castro

**Estampagem Incremental de Liga de Alumínio 1100 com
Ferramentas de Aço-Rápido Sem Revestimento e
Revestida de CrAIN**

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.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Rhander Viana

Brasília, DF

2024

Rafael Ramos Xavier de Castro

Estampagem Incremental de Liga de Alumínio 1100 com Ferramentas de Aço-Rápido Sem Revestimento e Revestida de CrAlN/ Rafael Ramos Xavier de Castro.
– Brasília, DF, 2024

48 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Rhander Viana

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2024.

1. Estampagem Incremental. 2. Revestimento CrAlN. 3. Alumínio 1100. 4. Rugosidade. I. Prof. Rhander Viana. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estampagem Incremental de Liga de Alumínio 1100 com Ferramentas de Aço-Rápido Sem Revestimento e Revestida de CrAlN

CDU 02:141:005.6

Rafael Ramos Xavier de Castro

Estampagem Incremental de Liga de Alumínio 1100 com Ferramentas de Aço-Rápido Sem Revestimento e Revestida de CrAIN

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.

Prof. Rhander Viana, UnB/FGA
Orientador

**Prof.: Danilo dos Santos Oliveira, IFG/
Goiânia**
Convidado 1

**Msc.: João Carlos Wohlgemuth,
UnB/FGA**
Convidado 2

Brasília, DF
2024

Resumo

O presente estudo visou analisar o comportamento do Alumínio 1100 quando exposto ao método de Estampagem Incremental de Chapas (ISF), especificamente pelo procedimento de Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF). A notoriedade deste processo adveio de sua execução simplificada e flexibilidade na fabricação de componentes, sendo amplamente aplicado tanto na prototipagem quanto na manufatura de peças em escala reduzida. Os experimentos foram conduzidos utilizando softwares CAD/CAM (Catia V5R21® e Fusion 360®), um centro de usinagem CNC de três eixos, duas ferramentas de aço rápido M2 (HSS-M2) com diâmetros de 8 mm, sendo uma sem revestimento e outra revestida de CrAlN (Nitreto de Cromo Alumínio), um prensa chapas, folhas de alumínio 1100 com 0,5 mm de espessura e lubrificante Performa CVT SAE20/JASOM315 1A. O propósito do trabalho foi comparar o desempenho das ferramentas de HSS-M2 sem e com revestimento na estampagem da chapa de alumínio 1100, avaliando a rugosidade média (Ra) da superfície estampada. Para esta avaliação, foi utilizado um planejamento fatorial 2^2 completo, variando-se o passo vertical da ferramenta e o ângulo de parede da peça conformada. Quanto aos resultados de rugosidade comparando as duas ferramentas. A rugosidade média com revestimento apresentou aumentos significativos em comparação com os valores sem revestimento. Na extremidade, houve um aumento de 88,46%, no meio o aumento foi de 148,98%, e no fundo, o aumento foi de 69,51%, totalizando um aumento médio de aproximadamente 102,00%. Esses resultados indicam que a aplicação do revestimento gerou uma elevação considerável na rugosidade média, apesar das imagens com estereomicroscópio mostrarem uma textura mais uniforme para as chapas ensaiadas com a ferramenta com revestimento.

Palavras-chave: Estampagem incremental, Revestimento CrAlN, Alumínio 1100, Rugosidade média (Ra).

Abstract

The present study aimed to analyze the behavior of Aluminum 1100 when exposed to the Incremental Sheet Forming (ISF) method, specifically the Single Point Incremental Forming (SPIF) procedure. The significance of this process comes from its simplified execution and flexibility in component manufacturing, being widely applied both in prototyping and in the production of small-scale parts. The experiments were conducted using CAD/CAM software (Catia V5R21® and Fusion 360®), a three-axis CNC machining center, two M2 high-speed steel (HSS-M2) tools with 8 mm diameters, one uncoated and the other coated with CrAlN (Chromium Aluminum Nitride), a sheet press, 1100 aluminum sheets with 0.5 mm thickness, and Performa CVT SAE20/JASOM315 1A lubricant. The aim of the work was to compare the performance of the HSS-M2 tools, both uncoated and coated, in the stamping of the 1100 aluminum sheet, evaluating the average roughness (Ra) of the stamped surface. For this evaluation, a full 2^2 factorial design was used, varying the tool vertical step and the wall angle of the formed part. Regarding the roughness results comparing the two tools, the average roughness with coating showed significant increases compared to the uncoated values. At the edge, there was an increase of 88.46%, at the middle, the increase was 148.98%, and at the bottom, the increase was 69.51%. These results indicate that the application of the coating caused a considerable increase in average roughness, although the stereomicroscope images showed a more uniform texture for the samples tested with the coated tool.

Key-words: Incremental stamping, CrAlN Coating, Aluminum 1100, Medium roughness (Rm).

Lista de ilustrações

Figura 1 – Parâmetros do processo de estampagem incremental	16
Figura 2 – Configuração base para estampagem incremental	17
Figura 3 – Técnicas para conformação em geometria cônica	19
Figura 4 – Quatro variantes do processo de Estampagem incremental assimétrica .	20
Figura 5 – Componentes da Estampagem incremental Assimétrica	21
Figura 6 – Esquema de estampagem incremental de ponto simples(SPIF)	22
Figura 7 – Geometria da ferramenta e velocidades do <i>spindle</i>	24
Figura 8 – Exemplos da relação entre espessura e ângulo de parede no SPIF	26
Figura 9 – CNC Romi D600	28
Figura 10 – Gráfico Ra, Rugosidade Média	31
Figura 11 – Fluxograma	32
Figura 12 – Prensa chapa	33
Figura 13 – Ferramenta revestida de CrAlN	34
Figura 14 – Rugosímetro Mitutoyo SJ-210 posicionado na base de medição	35
Figura 15 – Locais de medição da rugosidade	36
Figura 16 – Gráfico comparativo com passo de 0,2 mm fixo	38
Figura 17 – Gráfico comparativo com passo de 0,4 mm fixo	38
Figura 18 – Gráfico comparativo com ângulo de 54 fixo	39
Figura 19 – Gráfico comparativo com ângulo de 56 fixo	40
Figura 20 – Medição Rugosidade Ferramenta	41
Figura 21 – Imagens Microscópio ensaios com ferramenta com revestimento	43
Figura 22 – Imagens Microscópio ensaios com ferramenta sem revestimento	44

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características Romi D600	33
Tabela 2 – Fatores e Níveis	34
Tabela 3 – Variáveis para cada condição de ensaio	35
Tabela 4 – Medições de rugosidade comparando as duas ferramentas utilizadas nos ensaios	40
Tabela 5 – ANOVA Ângulo	41
Tabela 6 – ANOVA Passo	42
Tabela 7 – ANOVA Revestimento	42
Tabela 8 – Resultados da ANOVA para Ângulo, Revestimento e Passo	42

Lista de abreviaturas e siglas

3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACW	Rotação de ferramenta no sentido anti-horário
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho assistido por computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura Auxiliada por Computador)
CFC	Cúbica de Face Centrada
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> (Comando Numérico Computadorizado)
CrAlN	Nitreto de Cromo Alumínio
CW	Rotação de ferramenta em sentido horário
FGA	Faculdade do Gama
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i> (medida de condutividade elétrica com base no cobre)
IFB	Instituto Federal de Brasília
ISF	<i>Incremental Sheet Forming</i> (Estampagem Incremental de Chapas)
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedade dos Engenheiros Automotivos)
SPIF	<i>Single Point Incremental Forming</i> (Estampagem Incremental de Ponto Simples)
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
TPFI	<i>Two Point Incremental Forming</i> (Estampagem Incremental de Ponto Duplo)
UnB	Universidade de Brasília

Lista de símbolos

mm	Milímetro (Unidade de medida de comprimento)
rpm	Rotações por Minuto (Unidade de média de velocidade angular)
$^{\circ}C$	Graus Celsius (Unidade de medida de Temperatura)
ΔT	Graus Celsius (Variação de Temperatura)
ω	rad/s (Velocidade angular da ferramenta)
V_{fh}	mm/min (Velocidade de Avanço da ferramenta)
z	mm (Avanço da ferramenta na direção do eixo Z)
π	Pi (Constante de proporção numérica entre a circunferência e seu diâmetro)
RT	mm (Raio da ferramenta)
α	[$^{\circ}$] (Ângulo de parede da geometria)
$^{\circ}$	Graus (Unidade de medida de ângulo)
t_1	mm (Espessura final da chapa)
t_0	mm (Espessura inicial da chapa) ¹
μm	Micrômetro (Unidade de medida de comprimento)
$\%$	Percentual
R_a	μm (Rugosidade média)
l_m	μm (Comprimento da amostra)
R_q	μm (Amplitude entre o maior pico e maior vale)
R_z	μm (Rugosidade singular média)
Z_i	μm (Rugosidade singular)
l_v	μm (Trajeto prévio)
l_e	μm (Trajeto unitário)
l_n	μm (Trajeto posterior)

lt	μm (Trajeto do apalpador)
g/cm^3	Gramas por centímetros cúbicos (Unidade de medida de densidade)
$\text{Cal}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$	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

1	Introdução	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Estampagem Incremental	15
2.1.1	Estampagem	15
2.1.2	Estampagem Incremental	15
2.1.3	Histórico	15
2.1.4	Descrição	16
2.2	Vantagens e desvantagens da estampagem incremental	17
2.3	Tipos de estampagem incremental	19
2.3.1	Estampagem Simétrica	19
2.3.2	Estampagem Incremental Assimétrica	19
2.4	Estampagem incremental de ponto simples (SPIF)	21
2.4.1	Parâmetros de influência no processo da estampagem incremental	22
2.4.2	Rotação da ferramenta	23
2.4.3	Velocidade de avanço da ferramenta	24
2.4.4	Raio da ferramenta	25
2.4.5	Material da ferramenta	25
2.4.6	Ângulo de inclinação da parede da geometria	25
2.4.7	Espessura da chapa	26
2.4.8	Lubrificação	27
2.4.9	Temperatura	27
2.4.10	Maquinário utilizado	28
2.4.11	Revestimento da ferramenta	29
2.5	Propriedades da Liga de Alumínio 1100	29
2.6	Acabamento superficial Rugosidade média(Ra)	30
3	Materiais e Métodos	32
3.1	Materiais e equipamentos	32
3.1.1	Máquina CNC	32
3.1.2	Prensa Chapa e Ferramentas	33
3.2	Ensaio de rugosidade média (Ra) com Aplicação de Planejamento Fatorial Completo 2 ²	34
3.3	Análise Superficial da chapa de alumínio 1100	36
4	Resultados	37

4.1	Resultados Encontrados diante de todos os ensaios e medições	37
4.2	Resultados da ANOVA	41
4.3	Resultados Encontrados diante das imagens do estereomicroscópio e <i>Moun-</i> <i>tainsMap</i>	42
5	Conclusão	46
	Referências	47

1 Introdução

À medida que a tecnologia avança e a concorrência de mercado se intensifica, observa-se um aumento na necessidade de especialização e conhecimento aprofundado nos métodos de produção de componentes de geometrias complexas. Os processos de conformação mecânica são eficazes quanto a essa demanda, abrangendo tais requisitos. Esse método de fabricação é realizado a partir da deformação plástica para obtenção do produto final, mantendo o volume e massa do material ao longo do processo (OLIVEIRA, 2018).

Dentro da perspectiva de viabilizar a fabricação de peças com geometrias complexas, essa técnica de estampagem incremental também apresenta a vantagem quanto a simplicidade do *setup* e a redução de investimento inicial necessário, diferentemente de outras que possuem características que são desafiadoras ou até mesmo inviáveis de serem obtidas por meio de técnicas tradicionais de manufatura, que utilizam ferramentas como punções e matrizes. Dessa forma, essa técnica de conformação mecânica incremental tem encontrado aplicação crescente em diversos setores industriais como o da prototipagem rápida, automotiva, aeronáutica e biotecnologia (FAQUIM, 2020).

Entre os processos que compõem a conformação mecânica, a estampagem incremental, em inglês *Incremental Sheet Forming* (ISF) se destaca, este processo envolve a moldagem de chapas metálicas em uma forma predefinida com dimensões específicas. Pode-se executar o procedimento em uma fresadora ou centro de usinagem CNC de três eixos, assim como em robôs ou equipamentos servo-controlados específicos. Utiliza-se uma ferramenta de ponta semi-esférica acoplada ao eixo vertical do dispositivo para moldar a peça. O deslocamento dessa ferramenta segue uma rota definida, aplicando a estampagem de forma gradual na folha metálica (CESARO, 2010).

A estampagem incremental pode ser classificada em dois grandes grupos: ISF com dois pontos de apoio (*Two Points Incremental Sheet Forming*–TPIF) e ISF de ponto simples (*Single Point Incremental Sheet Forming* –SPIF). A conformação por TPIF utiliza dois ou mais pontos de apoio para auxiliar na conformação, sendo um a extremidade da ferramenta de conformação, e o segundo ponto de apoio um suporte simples ou uma matriz de suporte. Já a conformação por SPIF, que será utilizada no desenvolvimento desse trabalho, não emprega nenhum tipo de apoio ou matriz, apenas um ponto de conformação, que é da própria ferramenta, sendo portanto o mais econômico e simples. A principal diferença característica do processo SPIF é que envolve a deformação local e não a deformação global observada no processo de estampagem convencional. Essa característica faz com que a chapa sofra maior deformação antes que ocorra a fratura, porém a precisão os

limites do processo e a variação na espessura da chapa dos componentes formados são as principais limitações que dificultam sua aplicação como processo industrial para produção em massa (GOHIL; MODI, 2023).

O objetivo deste trabalho será comparar o desempenho de ferramentas de HSS-M2 sem e com revestimento (CrAlN) na estampagem da chapa de alumínio 1100, avaliando a rugosidade média (Ra) da superfície estampada. Para esta avaliação será utilizado um planejamento fatorial completo 2^2 , variando-se a passo vertical da ferramenta e o ângulo de parede da peça conformada.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- Avaliação do processo de estampagem incremental de ponto simples em chapa de alumínio 1100 com ferramentas de aço-rápido sem revestimento e revestidas de CrAlN (Nitreto de Cromo Alumínio);

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar a aplicabilidade do método de Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF) para conformação de chapas de alumínio 1100 com espessura de 0,5 mm;
- Comparar o desempenho de ferramentas de aço-rápido M2 (HSS-M2) sem revestimento e revestida de CrAlN na estampagem incremental de chapas de alumínio 1100 com espessura de 0,5 mm;
- Avaliar, mediante medição da rugosidade média (Ra) da peça conformada, a influência dos parâmetros ‘Passo’ e ‘Ângulo de parede’ da ferramenta por meio de um Planejamento Fatorial Completo 2^2 resultando em uma superfície de resposta.
- Avaliar o aspecto da superfície estampada por meio do software MountainsMap®.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Estampagem Incremental

2.1.1 Estampagem

A técnica de Estampagem para chapas metálicas é um método de conformação mecânica que emprega ferramentas de uso geral e de custo reduzido, permitindo a produção de componentes feitos de diferentes materiais, abrangendo uma ampla variedade de formatos. A estampagem pode ser executada em equipamentos CNC dedicados ou por meio da adaptação de máquinas de usinagem convencionais. Este método foi inicialmente descrito e protegido por patentes por Leszak em 1960 e Roux em 1967, em um período em que a tecnologia CNC estava ainda em seus estágios iniciais de desenvolvimento ([CASTELAN, 2010](#)).

2.1.2 Estampagem Incremental

Estampagem incremental de chapas é um processo de conformação inovador, capaz de produzir chapas de geometria complexa, utilizando a tecnologia CNC já amplamente difundida nos meios de manufatura dos metais. Apresenta como principais vantagens os baixos custos de preparação de máquina, a utilização de maquinário CNC de três eixos e grande flexibilidade, já que novos produtos são obtidos alterando-se apenas o seu modelo de Desenho Assistido por Computador(CAD), permitindo assim a produção de pequenos lotes e até mesmo em lotes de peças individuais, já que o custo do ferramental utilizado na estampagem incremental é bem menor do que o normalmente requerido nos processos de estampagem tradicionais ([SILVA, 2017](#)).

No processo de estampagem, a conformação das peças é obtida através da aplicação de pressões localizadas por meio de um punção, sendo na maioria dos casos uma ferramenta de ponta esférica, cuja geometria é menor do que a da chapa metálica. Este método de conformação é amplamente empregado na fabricação de peças para os setores automotivo, eletrônico e aeroespacial, pois permite a criação de componentes com elevada precisão e complexidade geométrica ([MATEUS, 2018](#)).

2.1.3 Histórico

A história do SPIF(*Single Point Incremental Forming*) começa em 1967, quando Leszak obteve a patente: Aparelho e Processo para conformação incremental sem matriz. A concepção era notavelmente avançada para a época, e os estudos pertinentes não tiveram

início até a chegada dos anos 90, quando a pesquisa foi realizada, o foco principal foi em sistemas rotacionais simétricos com geometrias que poderiam ser produzidos em um torno mecânico. A maior parte dessas pesquisas ocorreram no Japão.

Em 2001, foi introduzido o uso de uma fresadora CNC convencional de três eixos para a realização de operações de SPIF em componentes simétricos não rotativos. Esta inovação permitiu a manipulação e a modelagem de peças com maior precisão e eficiência, sem a necessidade de ferramentas rotativas especializadas. A técnica de SPIF, aplicada através da fresadora de três eixos, representou um avanço significativo na fabricação de componentes com geometrias complexas, antes disso, apenas máquinas CNC dedicadas estavam sendo usadas para SPIF. Este foi o ponto de partida para pesquisas fora do Japão, as quais foram disseminadas para outros países e pesquisadores.

SPIF é apenas um de um grupo de processos denominado *Incremental Sheet Forming* (ISF). Os processos têm muitas similaridades e a literatura quase sempre faz uma mistura de suas variações. SPIF é a versão verdadeiramente sem molde, sem qualquer suporte por baixo da chapa, ilustrado na Figura 1. *Two Point Incremental Forming* é a de dois pontos, a qual utiliza uma matriz parcial ou completa (MARTIN, 2008).

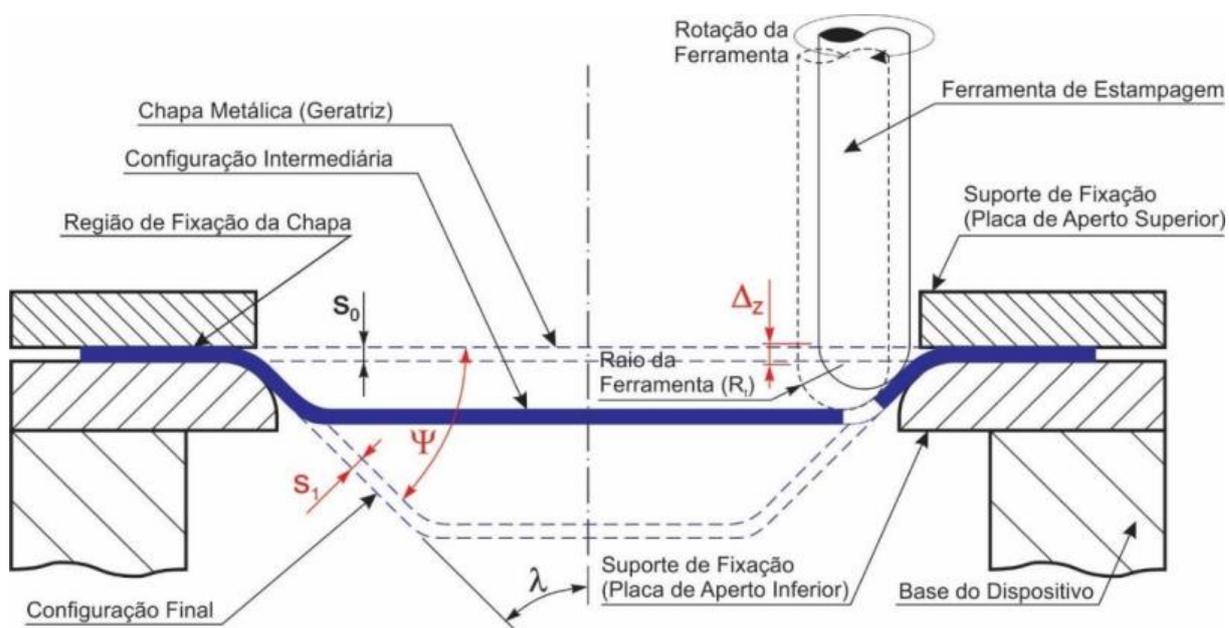


Figura 1 – Parâmetros do processo de estampagem incremental

Fonte:(SILVA; BAY; MARTINS, 2008).

2.1.4 Descrição

Para que a peça seja conformada, a ferramenta executa vários passes até chegar na profundidade e forma programada, e é por esse motivo que o processo é chamado de estampagem incremental (SILVA, 2017). Utiliza-se uma chapa ou *blank*, geralmente retangular e com espessura variando entre 0,5 e 1,5 mm, que é presa através de suportes

ou elementos de fixação em um dispositivo que se movimenta na direção vertical de uma máquina CNC, como pode ser visto na Figura 2. No eixo árvore da máquina CNC é acoplada a ferramenta própria para o processo de estampagem podendo ser rotativa ou não, geralmente com ponta esférica, semiesférica ou abaloada, essa ferramenta desliza sobre a chapa e através de incrementos gradativos na direção vertical conformando a chapa nos três eixos: X,Y e Z (CASTELAN, 2010).

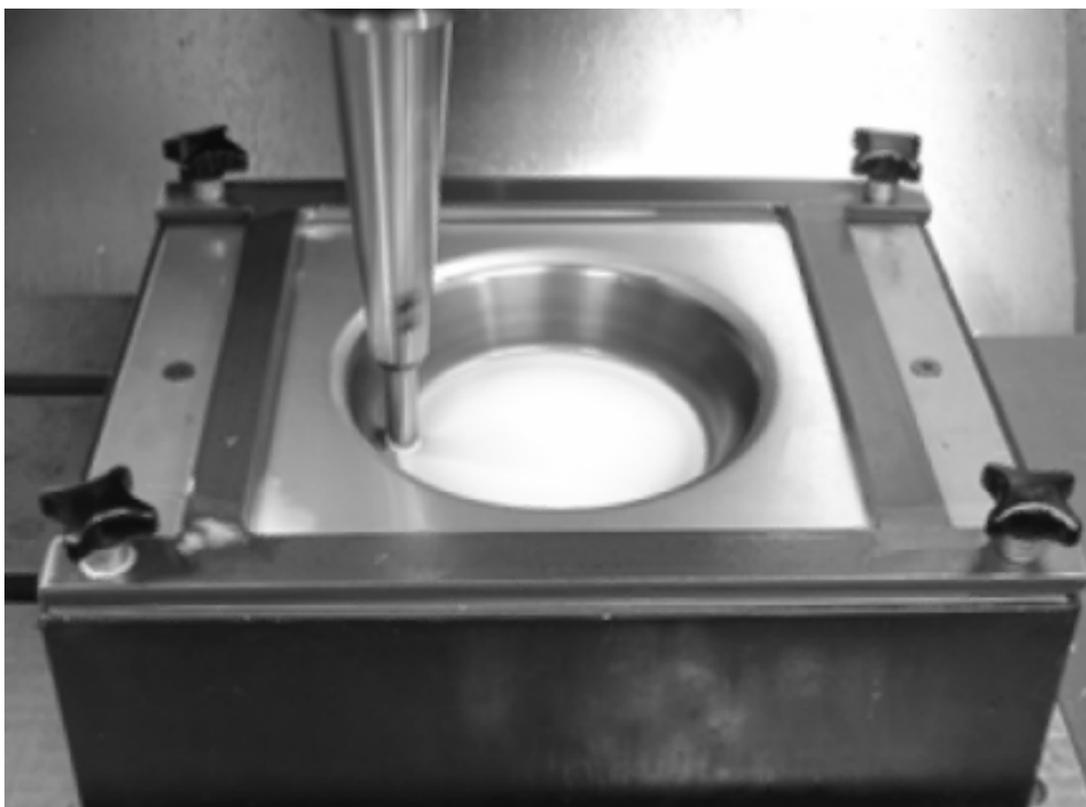


Figura 2 – Configuração base para estampagem incremental
Fonte:(MARTIN, 2008).

2.2 Vantagens e desvantagens da estampagem incremental

A técnica de estampagem incremental atende às demandas de companhias em busca de métodos eficazes e inovadores, oferecendo a possibilidade de diminuir tanto o tempo quanto os custos envolvidos no desenvolvimento, que permite o retorno do investimento mais rápido, assegurando abordagens de produção mais eficientes. Porém existem também pontos negativos nesse tipo de manufatura.

Como pontos positivos e considerados vantagens diante de outras técnicas, tem-se que (MICARI; AMBROGIO; FILICE, 2007; JESWIET et al., 2005);

- Custo de *set-up* praticamente nulo.
- O processo pode ser adaptado a um centro de usinagem .

- O componente a ser produzido pode ser executado a partir de um modelo CAD com uso de apenas uma ferramenta.
- Alterações no projeto de peças podem ser facilmente adaptadas, conferindo flexibilidade ao processo, sendo que o lote mínimo para a fabricação é uma peça.
- Este processo dispensa o emprego de matriz específica.
- As tensões originadas na zona de mudança de ângulo podem ser corrigidas e controladas.
- O nível de deformação máximo de alguns materiais é elevado.
- A qualidade do acabamento dos componentes pode ser controlada pelos parâmetros do processo, por exemplo, usando a variante com matriz total ou parcial.
- O funcionamento e modos de operação são, relativamente, poucos ruidosos.
- O processo pode ser usado para criação de protótipo e também pra reconstruir peças antigas, como, por exemplo, peças automotivas e até mesmo para obter próteses variadas.

Como pontos negativos e considerados desvantagens diante de outras técnicas, tem-se que (MICARI; AMBROGIO; FILICE, 2007; JESWIET et al., 2005):

- O tempo de processo para fabricação do componente, que quanto mais profunda e complexa a geometria, maior o tempo.
- A utilização deste processo está limitada à produção de pequenos lotes de peças.
- Ocorre retorno elástico e acúmulo de tensões residuais, tornando necessário o desenvolvimento de algoritmos de correção.
- Ângulos de paredes próximos a 90 graus são obtidos pela realização de varias etapas intermediárias.
- Dependendo da geometria final, as bordas da chapa que estão presas ao prensa chapa durante o processo de deformação, não sofrem ação da ferramenta de estampagem e podem se deformar pela ação das tensões residuais após a liberação do prensa chapa, causando erros dimensionais.
- As dimensões das peças são limitadas pelo tamanho do suporte de fixação das chapas.

2.3 Tipos de estampagem incremental

2.3.1 Estampagem Simétrica

O processo convencional de deformação incremental simétrica, ou também chamada de axissimétrica é designada por *spinning*. Esse processo envolve a aplicação de múltiplos incrementos de deformação extensiva em sequência, utilizando uma ferramenta de conformação que atua diretamente sobre o metal. Uma técnica relacionada, conhecida como *shear forming*, se assemelha ao *spinning*, mas se distingue por manter a ferramenta de conformação em contato contínuo com o metal, o que possibilita uma deformação uniforme seguindo o contorno geométrico do mandril que está girando.

O suporte móvel, que gira em conjunto com o mandril, mantém a chapa segura. Esta configuração é tipicamente encontrada em tornos, restringindo a produção a peças de geometria cilíndrica ou cônica. O mandril é modelado conforme o contorno interno do objeto a ser fabricado, enquanto a ferramenta de conformação, com seu design discoidal, auxilia na manipulação da chapa metálica (SENA, 2009). A Figura 3 ilustra os exemplos de movimento da ferramenta para conformar uma geometria cônica em chapa pelas duas técnicas, por várias passagens sobre a superfície: *spinning* (a) e o pelo método de contato permanente da ferramenta com a chapa: *shear forming* (b).

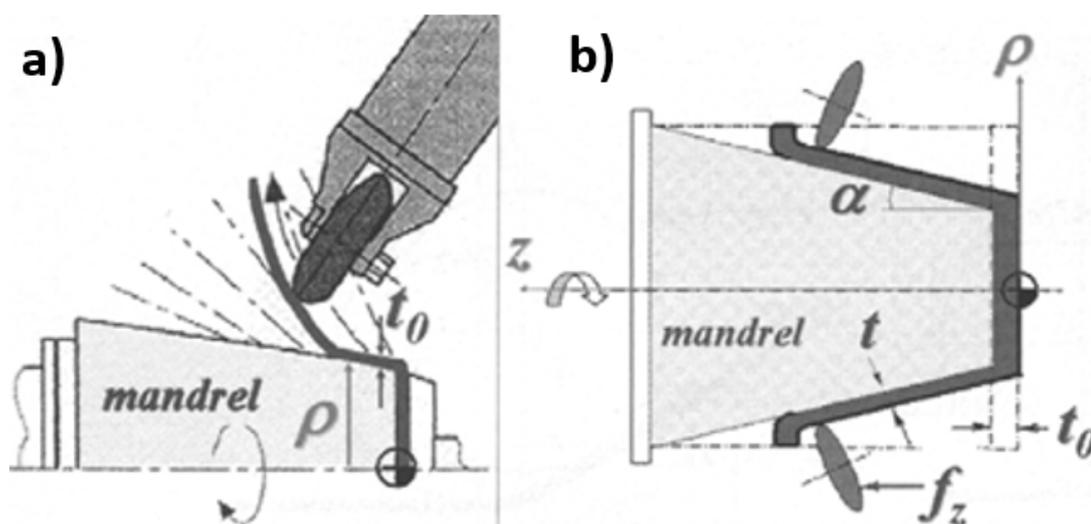


Figura 3 – Técnicas para conformação em geometria cônica
Fonte: (PHAM et al., 2006)

2.3.2 Estampagem Incremental Assimétrica

Conforme Jeswiet (2005), existem diversas interpretações para a estampagem incremental assimétrica (ASIF, sigla em inglês para “Asymmetric Incremental Sheet Forming”), que se manifesta em quatro variações de processo. No entanto, independentemente

dessas variações, todas as formas do processo de estampagem incremental assimétrica compartilham características comuns. Sendo essas:

- Ferramentas genéricas de pequenas dimensões;
- Ausência ou utilização de pequenas matrizes dedicadas
- Apresenta contato contínuo entre ferramenta e chapa;
- Pode produzir chapas metálicas assimétricas;

A conformação incremental assimétrica de chapa pode ser efetuada em uma máquina concebida especificamente para o processo ou pela adaptação a uma máquina CNC de 3 eixos, sendo este último o equipamento mais utilizado para a sua execução. A Figura 4 apresenta as diferentes configurações incluídas no grupo da técnica de conformação incremental assimétrica (SENA, 2009).

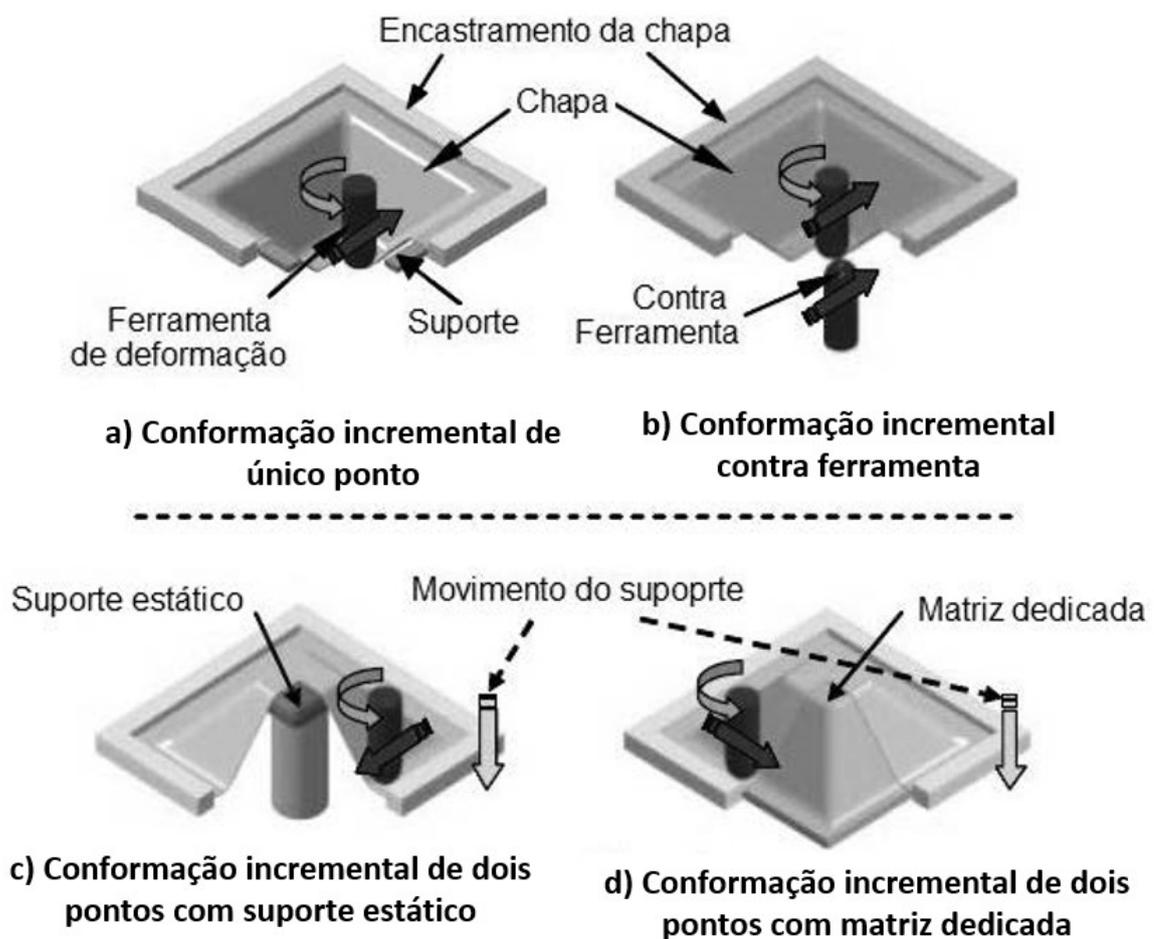


Figura 4 – Quatro variantes do processo de Estampagem incremental assimétrica
Fonte: (JESWIET et al., 2005)

A estampagem incremental assimétrica é constituída por quatro componentes : base, a chapa, o suporte de encastramento da chapa, a ferramenta de deformação, o

sistema de movimentação por CNC e o software CAD/CAM, como ilustrado na Figura 5 . O parâmetro F é a força da deformação da chapa, v é velocidade de movimento da ferramenta e ω é a rotação da ferramenta.

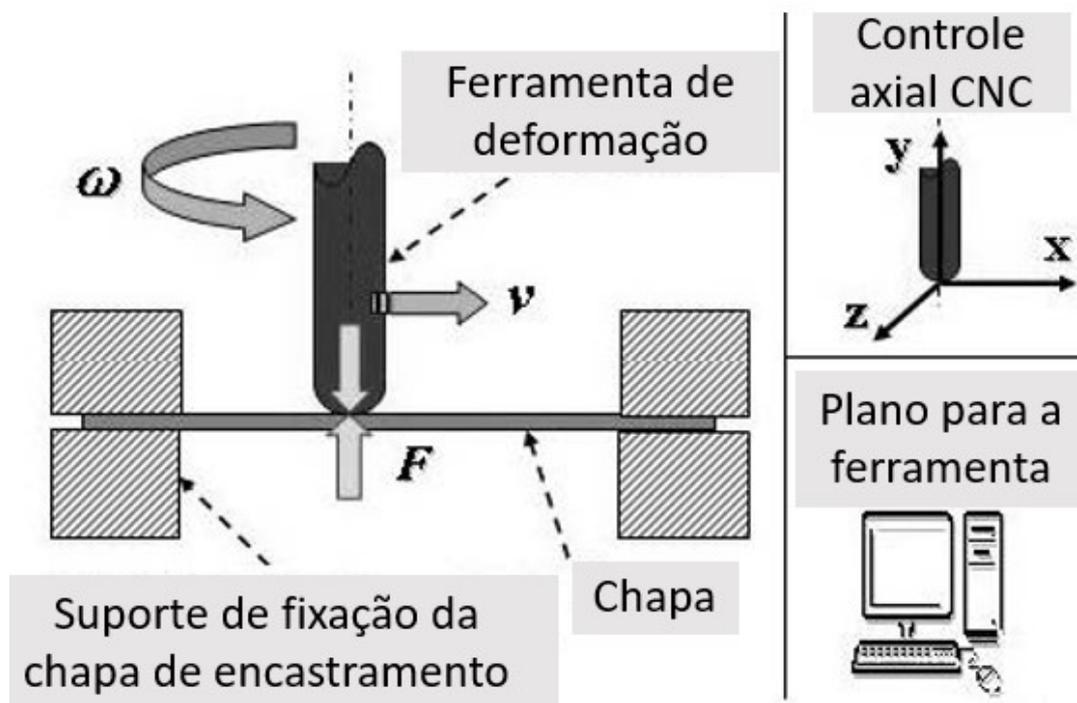


Figura 5 – Componentes da Estampagem incremental Assimétrica
Fonte: (JESWIET et al., 2005)

2.4 Estampagem incremental de ponto simples (SPIF)

Estampagem incremental de um ponto ou de ponto simples, será a técnica utilizada neste trabalho. A pesquisa sobre esse método específico de conformação foi conduzido por Jeswiet, Leach e Fratini (JESWIET et al., 2005) entre outros, evidenciou que este método pode ser aplicado em uma máquina CNC convencional de três eixos. Isso inclui o uso de softwares CAD/CAM para planejar a trajetória da ferramenta de conformação, permitindo a produção de peças com complexidade elevada.

Nesse método, a superfície da chapa não é suportada, sendo deformada de maneira “livre” pela ferramenta que desliza sobre ela, conforme ilustrado na Figura 6 . A deformação plástica é produzida pela ferramenta em rotação, que está acoplada ao eixo vertical principal do sistema CNC, por meio de incrementos negativos aplicados de forma gradual. Um sistema de fixação nas pontas da chapa impede que ela se mova durante a conformação. Enquanto a chapa está sendo deformada, a ferramenta de conformação entra em contato com a superfície interna do componente em produção, criando progressivamente uma concavidade. Além da flexibilidade de aplicação e utilização de ferramentas de baixo custo, existem ainda outras vantagens relacionadas quanto ao processo SPIF. Dispensa

qualquer tipo de matriz, precisando apenas de uma zona de suporte que possibilite criar ângulo de deformação na zona encastrada, as tensões originadas na zona de mudança de ângulo são facilmente corrigidas e controladas, uma máquina de CNC pode ser utilizada para aplicação deste processo, entre outras vantagens para aplicação da estampagem incremental.

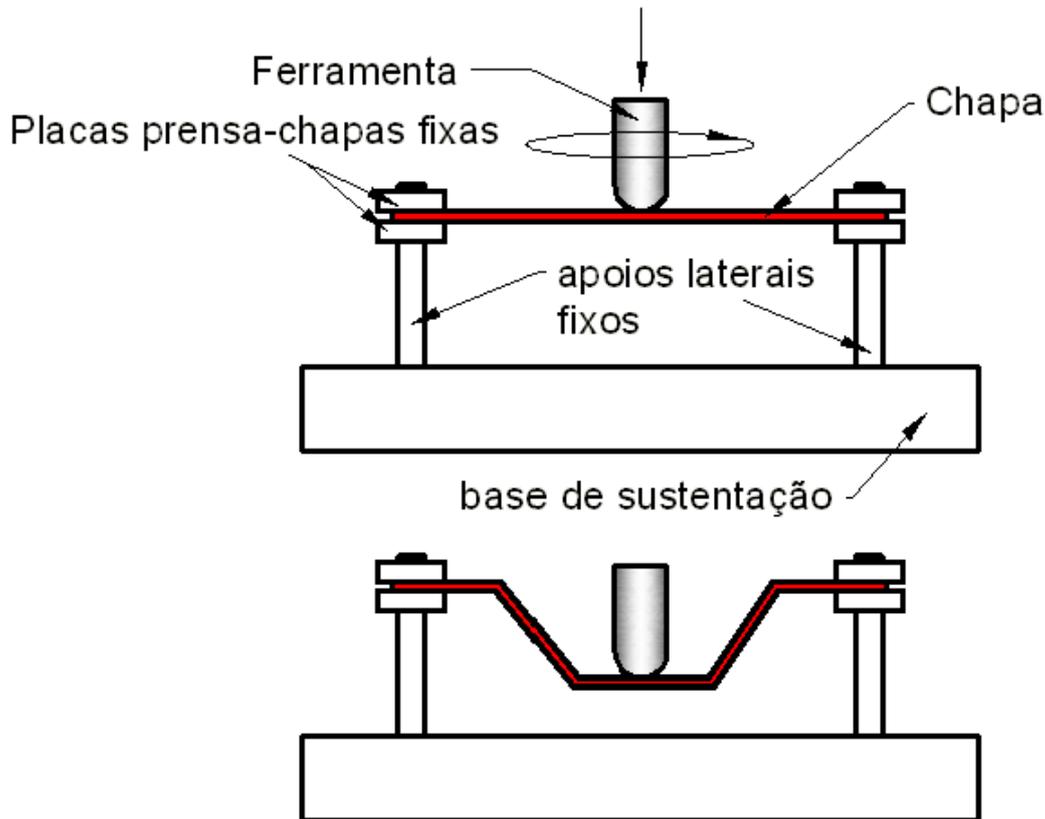


Figura 6 – Esquema de estampagem incremental de ponto simples(SPIF)
Fonte:(CASTELAN, 2010)

2.4.1 Parâmetros de influência no processo da estampagem incremental

O processo de estampagem incremental envolve um número considerável de parâmetros que têm um impacto significativo no processo. Entre eles, pode-se citar:

- Rotação da ferramenta
- Velocidade de avanço
- Raio da ferramenta
- Material da ferramenta
- Ângulo de parede
- Espessura da chapa

- Lubrificação
- Temperatura
- Maquinário utilizado
- Revestimento da ferramenta

Como cada tópico tem suas particularidades e devida importância, os parâmetros serão citados um a um em tópicos a seguir.

2.4.2 Rotação da ferramenta

Concedendo referência apenas ao método que será utilizado nesse trabalho, para o SPIF são considerados dois métodos, o primeiro deles é o de ferramenta livre, o qual não é imposto uma rotação pelo eixo da árvore da máquina, e o segundo, de ferramenta movida, o qual é imposto a rotação da ferramenta pelo eixo árvore da máquina (CESARO, 2010).

Uma das técnicas consiste em girar o *spindle*, movimentando assim pela superfície da chapa, ajustando esse parâmetro, é possível regular o calor gerado no metal durante o processo de deformação. O cálculo para esse procedimento utiliza um modelo o qual a ferramenta, que possui uma ferramenta com forma hemisférica, que é aplicada com pressão sobre o material a fim de provocar a deformação desejada no material teórico. O método de rotação livre é frequentemente empregado em equipamentos especializados em estampagem incremental, pois essas máquinas já possuem um suporte-ferramenta adequado para tal processo. Esse método é conhecido por proporcionar uma conformação eficaz da peça trabalhada.

Tendo em vista que a maioria das máquinas de conformação mecânica variam rotação entre 0 a 7000 rpm, O aquecimento proveniente da rotação da ferramenta pode ser devido ao ‘efeito do atrito’ ou ‘efeito térmico’. Esse primeiro fenômeno manifesta-se quando a ferramenta opera em rotações baixas, variando de 0 a 1000 rpm, a medida que a rotação vai aumentando o atrito diminui, melhorando assim o método de conformação, mas a partir de rotações mais altas de 2000 a 7000 rpm observa-se o efeito térmico, o qual verifica maior ductilidade do material. Já 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; BAY; MARTINS, 2008).

A equação 2.1 é utilizada para definição da velocidade angular (CESARO, 2010):

$$w = \frac{vfh}{\pi \cdot R_T \sqrt{\frac{1}{2}(1 - 2 * \cos 2\alpha)}} \quad (2.1)$$

Onde:

- ω = rotação (rpm)
- vfh = velocidade de avanço (mm/min)
- R_T = raio de ferramenta (mm)
- α = Ângulo de parede ($^\circ$)

A figura 7 indica alguns parâmetros utilizados na equação anterior.

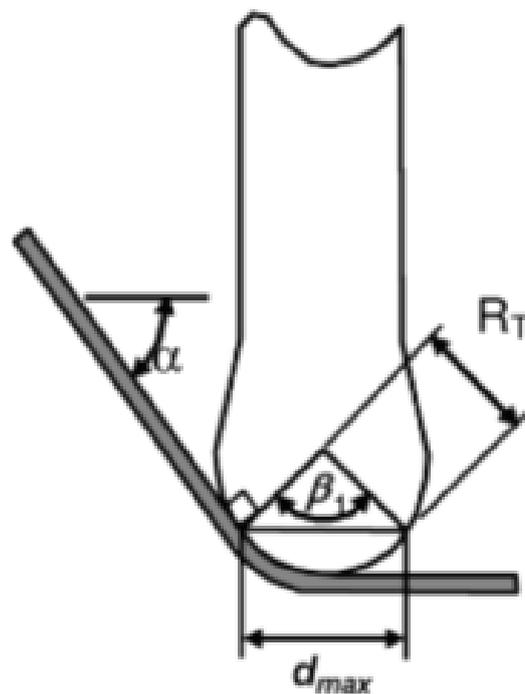


Figura 7 – Geometria da ferramenta e velocidades do *spindle*
Fonte:(JESWIET et al., 2005)

2.4.3 Velocidade de avanço da ferramenta

Os valores encontrados na literatura variaram de 500 a 1500 mm/min (Attanasio et al., 2008; Hussain et al., 2009; Hussain, G., Gao, L., Zhang, Z. Y., 2008; Dejardin et al., 2010). Rauch et al. (2009) comprovaram que quanto maior o avanço, maior será o erro de profundidade (retorno elástico) da chapa conformada em relação ao modelo CAD correspondente (CASTELAN, 2010)

A velocidade de avanço, avanço de máquina ou avanço de mesa representa a velocidade de movimentação da ferramenta em relação à peça conformada, sendo sua unidade mm/min. Esse parâmetro exerce a maior influência no tempo de manufatura e é preponderante no acabamento superficial da peça. O aumento dessa velocidade diminui a

conformabilidade do material. Estudos mostraram maior perda de conformação para valores superiores a 2500 mm/min.([SILVA; BAY; MARTINS, 2008](#))

2.4.4 Raio da ferramenta

Na técnica de estampagem incremental, o diâmetro da ferramenta desempenha um papel crucial, afetando não só a rotação, mas também sendo determinante para a qualidade do acabamento superficial, a profundidade de conformação e a duração do processo de fabricação. O raio de ponta da ferramenta, sendo um dos parâmetros a ser definido, varia de valores pequenos em torno de 6 mm até valores grandes por volta de 100 mm, dependendo da aplicação. Geralmente, o diâmetro escolhido baseia-se no menor raio presente na peça a ser produzida. No entanto, é necessário perceber que diâmetros pequenos, além de levar maior tempo na fabricação devido à necessidade de um maior número de passos na peça, também deixam maiores quantidades de marcas na peça.

O raio da ponta da ferramenta, como dito anteriormente, influencia diretamente no acabamento superficial da peça fabricada. Sendo que a utilização de raios pequenos provoca concentrações de tensão na zona de deformação da chapa, localizadas abaixo da ferramenta. Raios maiores tendem a distribuir a tensão para uma área maior, tornando a superfície da chapa mais lisa e com menos marcas causadas pela ferramenta. Diminuir o raio da ponta da ferramenta aumentará o limite de estampagem da chapa, entretanto, tornará a mesma mais frágil aos esforços triaxiais que ocorrem na conformação([CASTELAN, 2010](#)).

2.4.5 Material da ferramenta

Normalmente, as ferramentas para estampagem incremental são fabricadas em Aço-ferramentas, que são as que fazem parte do seletto grupo de aços especiais, trata-se de classe de aço de alta liga muito utilizado em ferramentas de corte, matrizes e moldes. Um outro material também utilizado é das ferramentas de Metais Duros, materiais comumente utilizados em ferramentas de usinagem. Esses materiais são comumente empregados por apresentarem boas propriedades tribológicas além de melhores características em relação aos materiais que são normalmente conformados .Todas essas ferramentas possuem a ponta semi-esférica ([FURLANETTI, 2014](#)).

2.4.6 Ângulo de inclinação da parede da geometria

O ângulo de inclinação de parede da chapa (ângulo ψ , Figura:1) é o fator limitador mais importante na estampagem incremental, já que a diminuição de espessura da chapa ocorre à medida em que este ângulo aumenta ([CASTELAN, 2010](#)).

A execução em múltiplos passes visa ampliar os limites de estampagem, que são fortemente influenciados pelo ângulo de parede ($^{\circ}$). A realização de passes de estampagem intermediários, incrementando o ângulo de parede, pode aumentar o valor final do ângulo ψ , sem ocasionar o rompimento da chapa (Dufrou, et al. 2008). À medida que as etapas ocorrem, os ângulos de parede e o grau de encruamento aumentam, enquanto a espessura (s) diminui (CASTELAN, 2010).

A equação 2.2 é utilizada para definir o ângulo máximo que pode ser obtido a partir da lei do seno (CASTELAN, 2010):

$$t1 = t0 * \sin(90^{\circ} - \alpha) \quad (2.2)$$

Onde:

- $t1$ = espessura final (mm)
- $t0$ = espessura inicial (mm)
- α = Ângulo de parede ($^{\circ}$)

A Figura 8 exemplifica a relação entre o ângulo de parede e a espessura da chapa

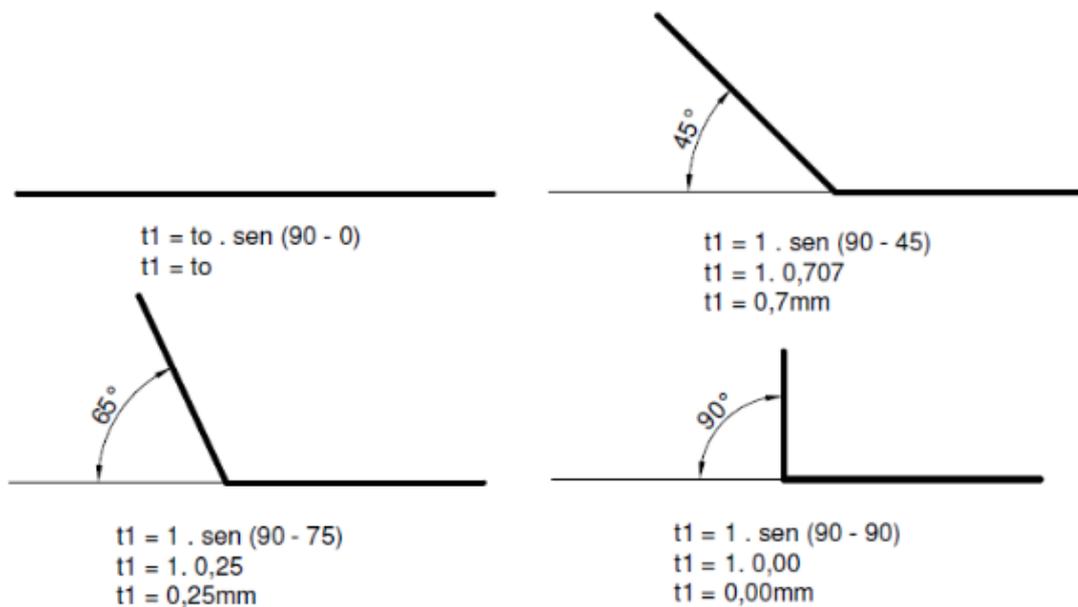


Figura 8 – Exemplos da relação entre espessura e ângulo de parede no SPIF
Fonte:(CASTELAN, 2010)

2.4.7 Espessura da chapa

A espessura da chapa é limitada pela capacidade da máquina utilizada no processo. Uma chapa mais espessa permite o uso de um ângulo de parede maior e melhora

a conformabilidade. Contudo, isso também eleva a força de contato entre a ferramenta e a chapa, resultando em um aumento da força no eixo árvore. Esse incremento pode ser danoso para máquinas que foram adaptadas para o processo, a exemplo dos centros de usinagem CNC (SENA, 2009).

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).

2.4.8 Lubrificação

A lubrificação desempenha um papel crucial na maior parte dos procedimentos de estampagem, sendo particularmente vital na estampagem incremental. A aplicação da lubrificação durante o processo visa alcançar várias metas, tais como (DALEFFE, 2008):

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

O volume necessário de uso varia conforme a espessura e a natureza do material da placa destinada à estampagem. É aconselhável aplicar um lubrificante para preservar as características tribológicas do material, bem como para minimizar quaisquer mudanças que possam ocorrer em relação à temperatura, textura superficial e desgaste tanto da placa quanto do equipamento utilizado (SENA, 2009).

2.4.9 Temperatura

No processo de SPIF, a temperatura desempenha um papel crucial, pois o atrito contínuo entre a ferramenta de conformação e a chapa resulta na produção de calor. Este calor eleva a temperatura do material e portanto, também da ferramenta, facilitando sua moldagem devido ao aumento de maleabilidade. Esse fenômeno contribuiu para a criação de dispositivos que aquecem a chapa durante a etapa de moldagem. É importante observar cuidadosamente o superaquecimento durante o processo, que pode causar o desgaste acelerado das ferramentas, capaz de prejudicar o processo.

Ao regular a temperatura do material, pode-se produzir componentes que apresentam uma estrutura com tensões residuais reduzidas. Isso leva a processos mais consistentes

com resultados que se alinham melhor com os desenhos CAD, resultando também em tempos de moldagem mais curtos. Como resultado direto, há uma diminuição nos custos associados à produção (SILVA; BAY; MARTINS, 2008).

2.4.10 Maquinário utilizado

Para a execução do SPIF, a infraestrutura requerida é bastante parecida com a da usinagem CNC. Ela emprega o CAD para criar a geometria e o CAM para a interação com o equipamento, diferindo somente na ferramenta de trabalho e no mecanismo de fixação do metal. Isso torna possível o uso de centros de usinagem CNC com mínimas modificações. Robôs industriais adaptados ou equipamentos específicos para estampagem incremental também são opções viáveis. O maquinário a ser utilizado irá depender da disponibilidade, tamanho da peça, forma construtiva da máquina e capacidade de comando, entre outros fatores. (SILVA; BAY; MARTINS, 2008).

A máquina que será utilizada nesse trabalho será a Romi D600, representado na Figura 9, um modelo de maquinário CNC.



Figura 9 – CNC Romi D600

2.4.11 Revestimento da ferramenta

Os revestimentos cerâmicos são comumente utilizados em várias ferramentas e componentes para melhorar a resistência contra corrosão e desgaste, graças à sua elevada dureza e estabilidade química. O CrAlN, em particular, tem atraído atenção significativa em estudos recentes por sua dureza superior, estabilidade térmica notável e resistência à oxidação, suportando temperaturas operacionais de até 1000 °C. Contudo, a aplicação de materiais de engenharia muitas vezes se depara com limitações devido à tenacidade à fratura, mais do que a dureza, sobretudo em cerâmicas como os revestimentos de nitretos metálicos. Com a fragilidade inerente aos revestimentos de nitreto duro, o desafio persiste em aprimorar a dureza e a tenacidade ao mesmo tempo, particularmente no caso do sistema CrAlN, que apresenta propriedades cerâmicas características devido à ligação covalente robusta entre Al e N.(ZHOU; QIU; ZENG, 2020).

2.5 Propriedades da Liga de Alumínio 1100

A aplicação do alumínio se dá pelas suas características mecânicas como de um material com modo de elasticidade baixo comparado aos aços, possui ótima resistência à corrosão, boa tenacidade, condutibilidade térmica, baixo peso específico tornando-o de grande importância e utilização em equipamentos de transporte ferroviário, rodoviário, aéreo e naval. Devido a sua alta ductilidade é um material de fácil laminação e forjamento, sendo utilizado em forma de chapas sem grandes problemas, além da sua vasta aplicação na indústria (CALLISTER; SOARES, 2008). Algumas propriedades:

- Leveza: Se apresenta como uma das principais características, tendo uma densidade de 2,71 g/cm³, 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.
- Possui boa condutibilidade elétrica, 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;
- Elevada Reflexibilidade;

- 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.
- 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.

Embora o alumínio geralmente tenha uma resistência mecânica menor que o aço, ele pode suportar uma carga maior quando consideramos sua relação peso-resistência. A resistência mecânica do alumínio pode ser aumentada por meio de deformação plástica a frio ou pela criação de ligas metálicas. No entanto, esses processos podem reduzir a resistência do material à corrosão. (CALLISTER; SOARES, 2008).

2.6 Acabamento superficial Rugosidade média(Ra)

O acabamento superficial é caracterizado essencialmente pela rugosidade, que se refere a um agrupamento de irregularidades superficiais que, em conjunto, formam uma textura ou padrão distintivo na superfície do material. Este padrão não apenas contribui para a estética do material, mas também influencia diretamente suas propriedades funcionais, como aderência, lubrificação e capacidade de carga(MACHADO et al., 2009).

No processo de estampagem incremental, a obtenção de superfícies perfeitamente ideais é inviável. Microscopicamente, a superfície de um objeto apresenta áreas com diferentes graus de planicidade, característica conhecida como rugosidade superficial. Embora a olho nu, em uma análise macroscópica, o objeto possa parecer ter uma superfície uniformemente lisa, a realidade microscópica revela uma complexidade de contornos e texturas que definem a rugosidade da peça.

A Rugosidade Média (Ra) é calculada como a média aritmética dos desvios absolutos das alturas dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média ao longo do comprimento de medição, como mostrado na Fig. 10. Pode-se visualizar essa medida como a altura de um retângulo imaginário que possui a mesma área total que a soma das áreas entre o perfil de rugosidade e a linha média, distribuídas ao longo do comprimento de medição. Essa métrica é fundamental para entender a textura superficial de um material e sua adequação para diferentes aplicações.(MATEUS, 2018)

A equação 2.3 expressa a formula matemática para se calcular este parâmetro.

$$Ra = \frac{1}{Q} \int_0^Q [f(x)] dx \quad (2.3)$$

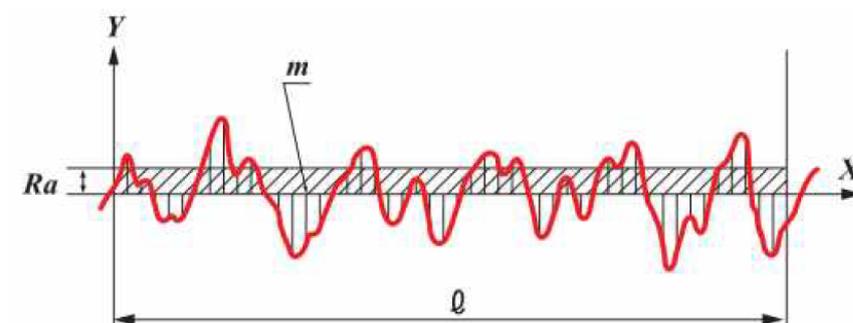


Figura 10 – Gráfico Ra, Rugosidade Média
Fonte:([MATEUS, 2018](#))

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo, são descritos os materiais, ferramentas, métodos e procedimentos de trabalho que foram utilizados nos ensaios de estampagem incremental de ponto único com alumínio 1100. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Processos de Fabricação da Faculdade Gama da Universidade de Brasília (UnB-Fga), seguindo o fluxograma da Figura 11.

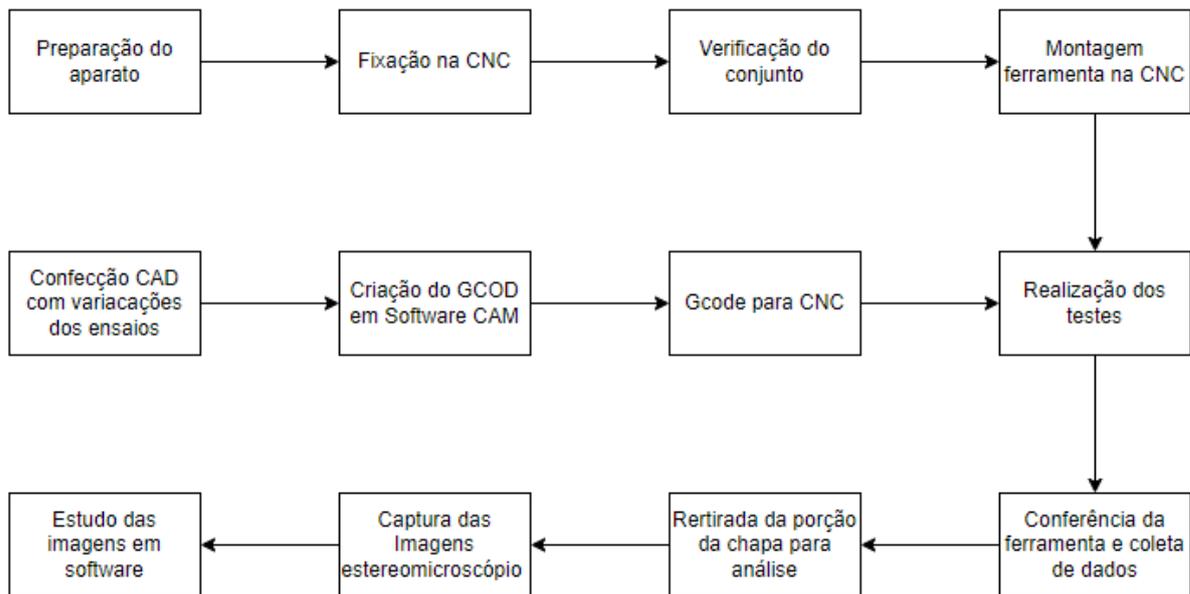


Figura 11 – Fluxograma
Fonte: Autoral

3.1 Materiais e equipamentos

3.1.1 Máquina CNC

Para realização do processo de estampagem incremental de ponto simples (SPIF), foi utilizado um centro de usinagem Romi D600. As principais informações da máquina são apresentadas na tabela 1 seguir:

Potência Total	18kVA
Motor Principal	10 cv
Comando	Fanuc OI-MD
Faixa de velocidades	7500 rpm
Cone do eixo-árvore	ISO40
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	800kg
Diâmetro máximo de ferramenta	80 mm

Tabela 1 – Características Romi D600
Fonte:(Romi)

3.1.2 Prensa Chapa e Ferramentas

Para a fixação da chapa de alumínio 1100 com dimensões 0,5 x 250 x 250 mm na mesa do centro de usinagem CNC, foi empregado um equipamento formado por uma chapa de fixação de 370 x 256 x 10 mm em Aço A36, mostrado na Figura 12, material comum na construção civil e similar ao aço 1020. Este conjunto incluiu também quatro tarugos de aço 1045, medindo 76 mm de comprimento, 21 mm de diâmetro maior e 12 mm de diâmetro menor, com rosca M12 de passo 1,25 e um furo interno de 12 mm com rosca M10 de passo 1,5. Estes tarugos foram acoplados tanto na chapa de fixação quanto no suporte inferior do Blank. O dispositivo de fixação do Blank contou com dois quadrados de 250x250x25 mm em aço, apresentando uma cavidade de 148 x 148 mm e 24 furos, dos quais 20 possuíam roscas M12 localizadas somente no fixador inferior.

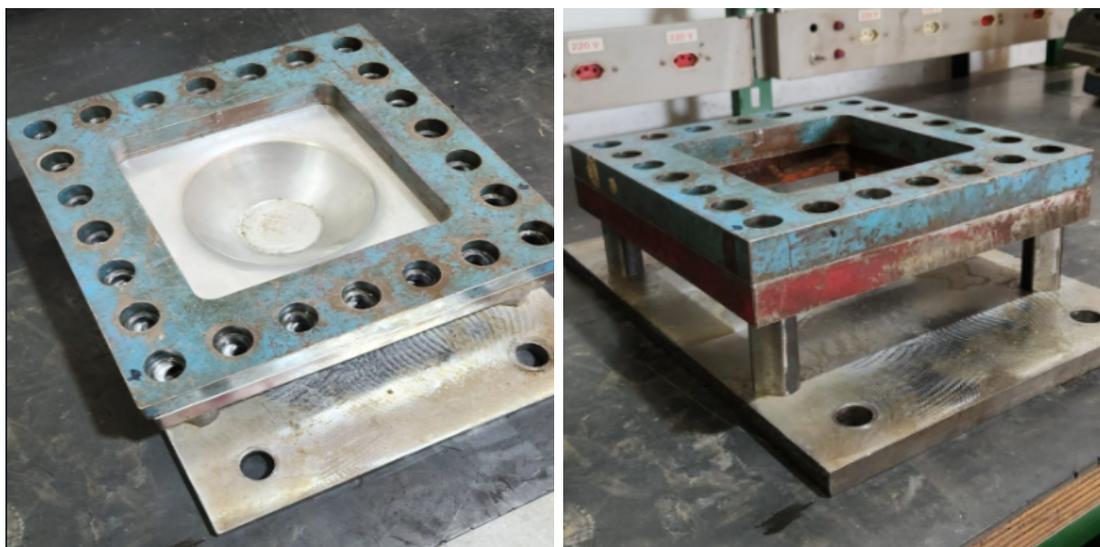


Figura 12 – Prensa chapa
Fonte:Autorial.

Para os ensaios foi utilizada uma ferramenta de aço-rápido M2 com comprimento de 120 mm e diâmetro de 8 mm. A ferramenta de HSS-M2 foi composta por duas pontas esféricas, sendo uma sem revestimento e outra revestida de CrAlN. A Figura 13 mostrou a imagem da ferramenta de HSS-M2 que foi utilizada nos ensaios do trabalho.



Figura 13 – Ferramenta revestida de CrAlN
Fonte: Autoral.

3.2 Ensaio de rugosidade média (Ra) com Aplicação de Planejamento Fatorial Completo 2^2

Nesta pesquisa foi realizado um planejamento fatorial completo 2^2 , com variação do passo vertical e do ângulo de parede da peça, mantendo-se constante a velocidade de avanço (900 mm/min) e rotação livre do eixo árvore. A Tabela 2 mostra os valores, de passo vertical e ângulo de parede, que foram utilizados nos ensaios de rugosidade média (Ra).

Passo Vertical (mm)	Ângulo de parede (°)
0,2	54
0,4	56

Tabela 2 – Fatores e Níveis

Seguindo esses parâmetros de passo vertical e ângulo de parede os ensaios foram realizados da seguinte maneira, como mostrado na 3

Condições	Passo vertical (mm)	Ângulo de parede (°)
1	0,2	54
2	0,2	56
3	0,4	54
4	0,4	56

Tabela 3 – Variáveis para cada condição de ensaio

O planejamento fatorial completo 2^2 foi aplicado tanto para a ferramenta de HSS-M2 sem revestimento quanto para a revestida de CrAlN. Além disso, os ensaios foram realizados com uso de óleo Performa CVT SAE20/JASOM315 1A. Na medição da rugosidade média (R_a) foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo SJ-210, conforme mostrado na Figura 14. Foram escolhidos três pontos diferentes de medição da peça estampada, no sentido de laminação da chapa (próximo da borda, no meio da geometria e próximo ao fundo), como mostrado na Figura 15.



Figura 14 – Rugosímetro Mitutoyo SJ-210 posicionado na base de medição
Fonte: (NASCIMENTO, 2023)

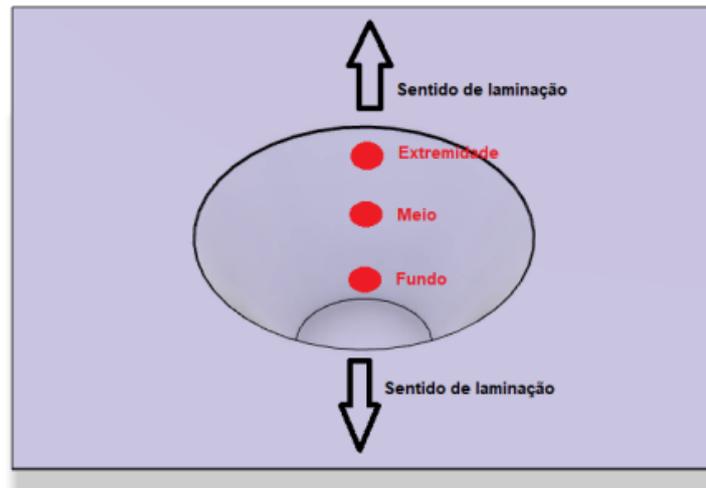


Figura 15 – Locais de medição da rugosidade
Fonte: (NASCIMENTO, 2023)

3.3 Análise Superficial da chapa de alumínio 1100

Após os ensaios de rugosidade média (R_a), uma amostra foi extraída da placa de alumínio 1100 com o intuito de se analisar a superfície da textura estampada. Foi realizada uma imagem da amostra utilizando um estereomicroscópio modelo Zoom 645T. Essa imagem foi posteriormente tratada por meio do software MountainsMap®, uma ferramenta que forneceu uma análise da topografia das superfícies, sem muitos detalhes por conta da versão que foi utilizada (versão de teste do software) e fornecida para análises, identificando apenas diferença de texturas, identificando ondulações, marcas de avanço das ferramentas e possíveis defeitos superficiais.

4 Resultados

4.1 Resultados Encontrados diante de todos os ensaios e medições

Diante dos resultados obtidos nos ensaios, foi realizada uma análise comparativa considerando as condições experimentais aplicadas. Para isso, foram avaliados os efeitos das variações do ângulo de parede e do passo vertical, mantendo-se as demais condições constantes. Além disso, foram comparados os desempenhos da ferramenta de HSS-M2 sem revestimento e com revestimento de CrAlN, todos realizados com o uso de óleo de CVT. Essa abordagem permitiu identificar as influências específicas de cada parâmetro no desempenho do processo e nas características superficiais das peças estampadas.

As Figuras 18 e 19 apresentam a comparação dos resultados obtidos nos ensaios com ângulos fixos, considerando as diferentes rugosidades médias resultantes. Essa análise leva em conta as condições específicas de cada ensaio, conforme descrito na Tabela 3. Além disso, observa-se claramente nos gráficos das Figuras 16 e 17 que o aumento do passo vertical de 0,2 mm para 0,4 mm resulta em um acréscimo na rugosidade média (Ra) da superfície estampada. De acordo com estudo (MATEUS, 2018), o passo tem uma influência significativa na precisão geométrica e na qualidade do acabamento superficial da chapa conformada por estampagem incremental.

A precisão geométrica aumenta à medida que o passo diminui, possivelmente porque os contornos de conformação da chapa se tornam mais definidos com valores menores do passo, permitindo uma maior precisão na formação da geometria. O movimento da ferramenta seria menor entre dois contornos paralelos adjacentes, proporcionando uma distribuição mais homogênea do material e da deformação, além de reduzir o efeito de retorno elástico da chapa. O aumento do passo provoca um aumento na rugosidade da chapa, pois os contornos de conformação são mais profundos devido ao maior movimento da ferramenta, resultando em uma distribuição irregular do material e, conseqüentemente, uma superfície mais rugosa (KUMAR, 2024).

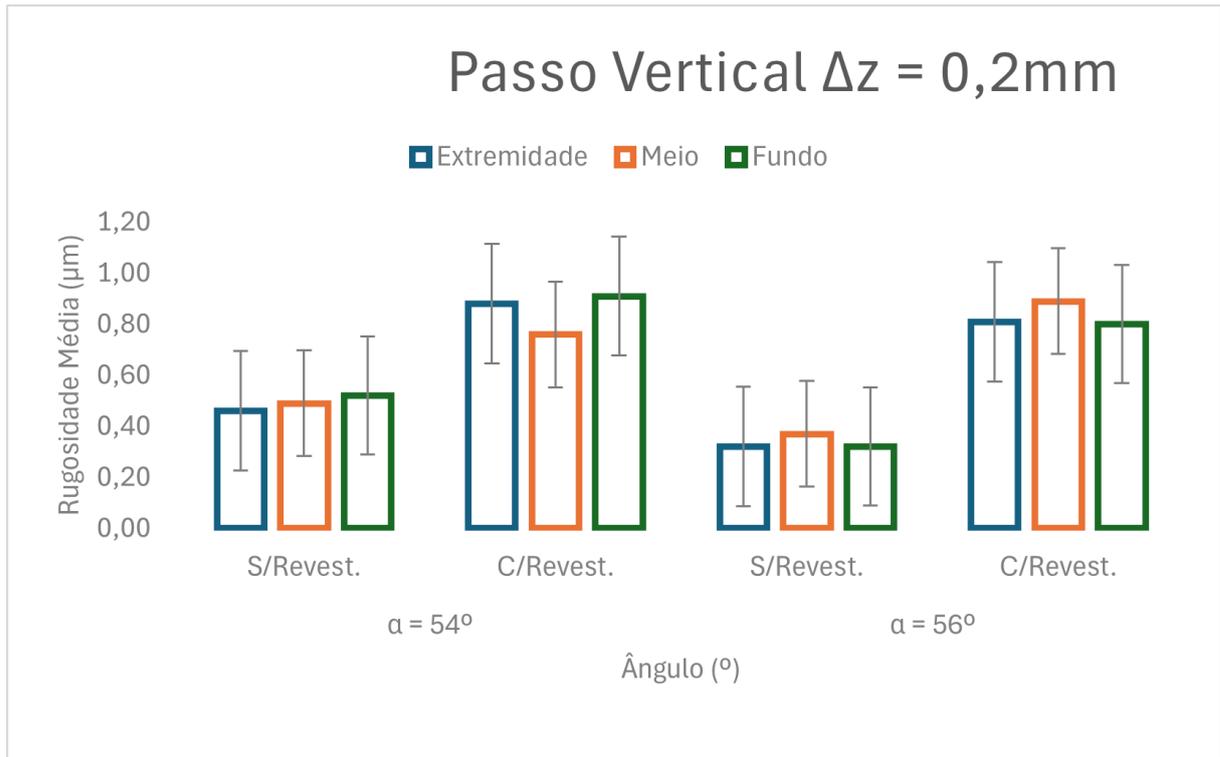


Figura 16 – Gráfico comparativo com passo de 0,2 mm fixo
 Fonte:Autoral.

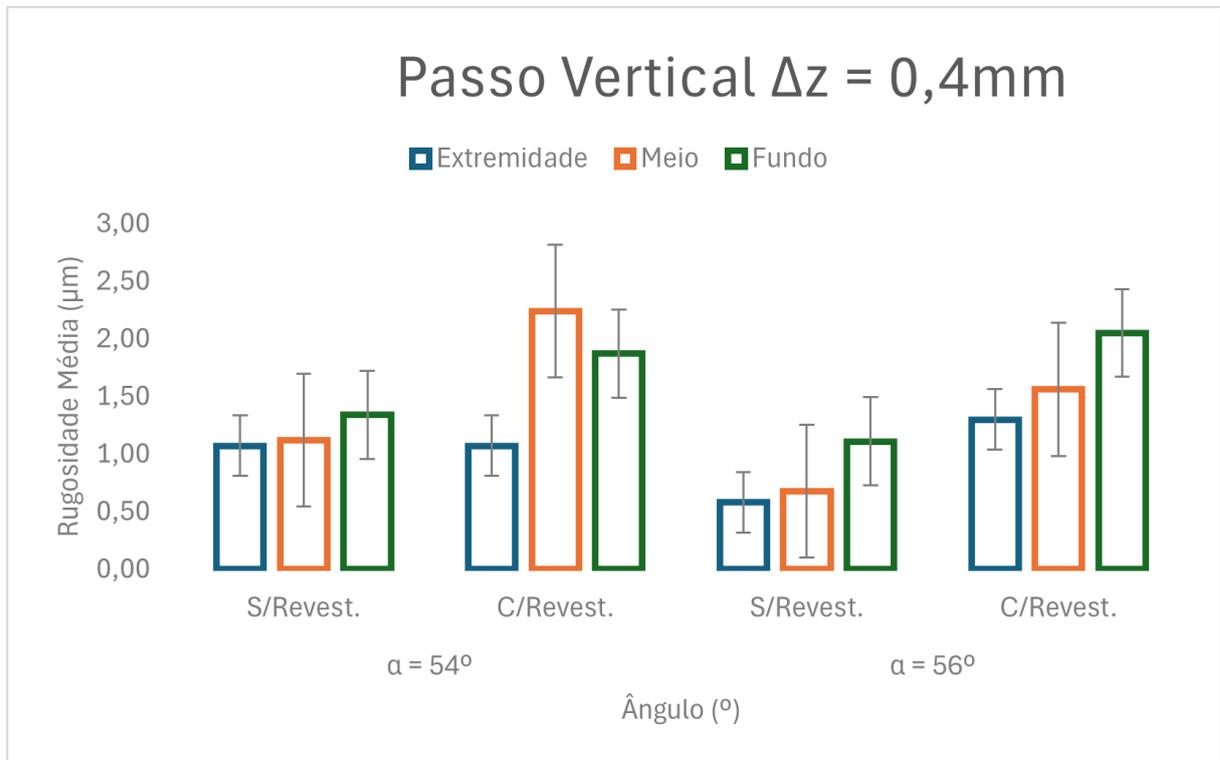


Figura 17 – Gráfico comparativo com passo de 0,4 mm fixo
 Fonte:Autoral.

Quanto ao ângulo de parede, os ensaios com maior ângulo apresentaram menor rugosidade no geral, Figuras 18 e 19. Visto que a angulação maior faz com que o ma-

terial se desloque mais em um dos eixos cartesianos, neste caso em Z, promovendo uma superfície menos rugosa. Para (SILVA; BAY; MARTINS, 2008), o ângulo de parede e o passo impactam significativamente na rugosidade da superfície conformada, enquanto a velocidade de avanço tem pouca ou nenhuma influência. À medida que o ângulo da parede aumenta, a distância direta entre os dois contornos de deformação subsequentes diminui, resultando em um melhor acabamento superficial. Porém diante disso, também há limites, produzir componentes com ângulos de parede muito elevados é uma limitação do SPIF. Em ângulos de parede muito elevados, a deformação é relativamente maior, resultando em fraturas da chapa.

Pode-se evidenciar esse tópico comparando os resultados das condições de ensaio da Figura 18 e da Figura 19, por exemplo, as quais são perceptíveis valores de Rugosidade Média (Ra) no caso de 56 graus, sempre menores que no ensaio com 54 graus de ângulo de parede (Figura 19).

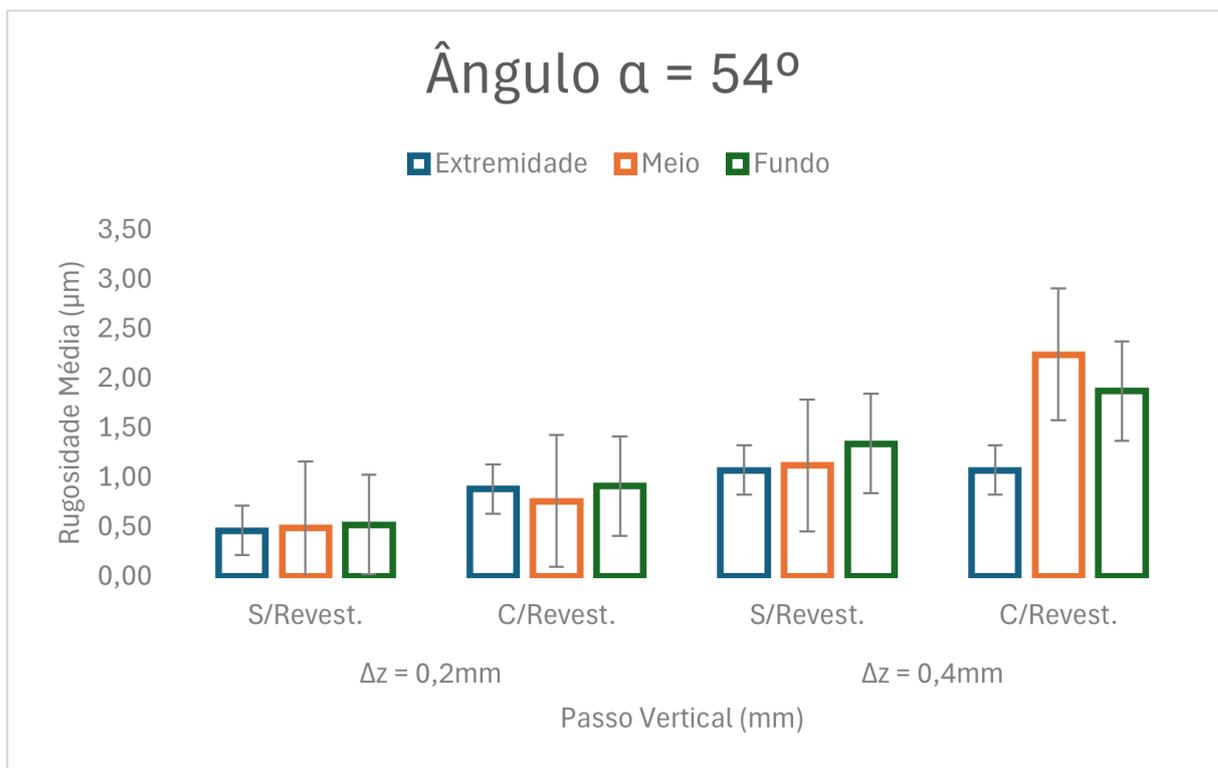


Figura 18 – Gráfico comparativo com ângulo de 54 fixo
Fonte:Autorial.

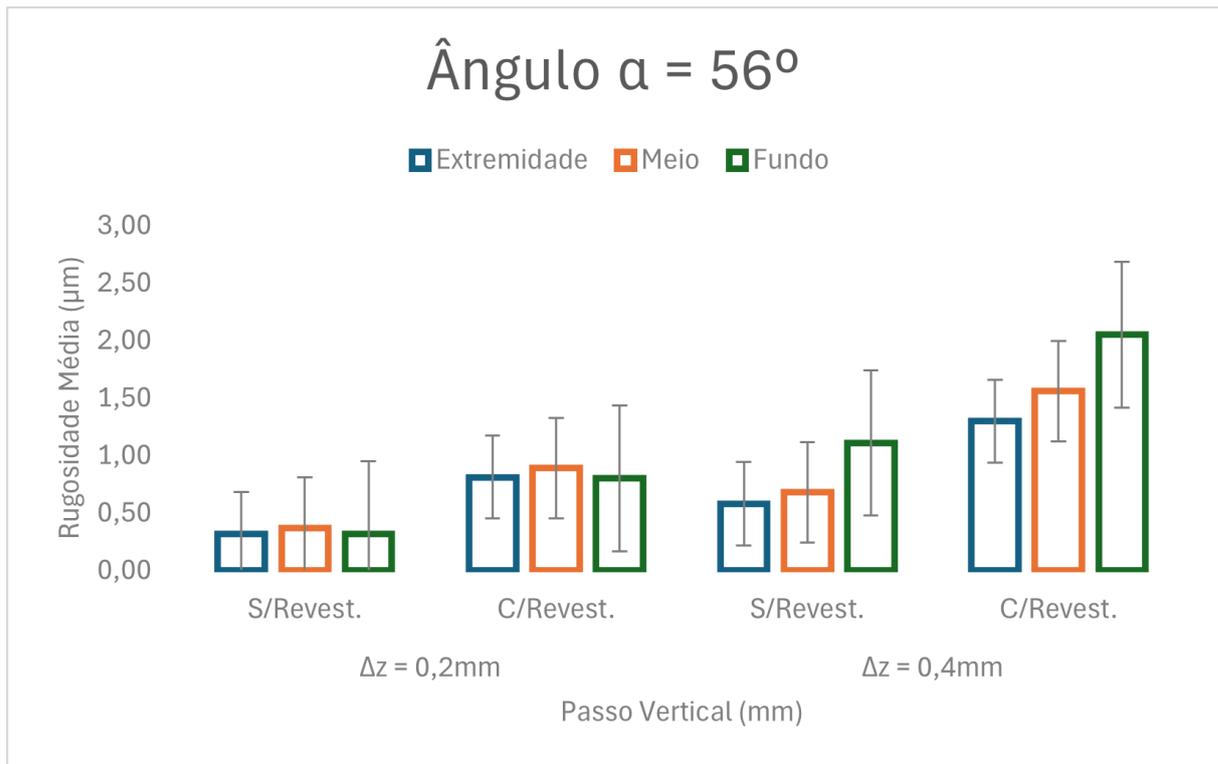


Figura 19 – Gráfico comparativo com ângulo de 56° fixo
Fonte: Autoral.

Outro aspecto importante mostrado nas Figuras 18, 19, 16 e 17 foi a maior rugosidade média (Ra) da superfície estampada pela ferramenta revestida de CrAlN. Foram realizadas três medidas de rugosidade média (Ra) nas extremidades da ferramenta de HSS-M2, e os resultados mostraram uma maior rugosidade para a extremidade revestida de CrAlN, com rugosidade (Ra) de $0,63 \mu\text{m}$, enquanto para a extremidade sem revestimento a rugosidade (Ra) foi de $0,29 \mu\text{m}$. Provavelmente, essa maior rugosidade da extremidade da ferramenta revestida de CrAlN provocou uma textura superficial mais “áspera” em escalas microscópicas, aumentando a interação mecânica entre a ferramenta e a chapa de alumínio durante a conformação e transferindo características dessa textura para a superfície da peça.

A tabela 4 mostra os valores de rugosidade para as duas ferramentas analisadas e medidas de acordo com a Figura 20.

Rugosidade da Ferramenta com e sem revestimento				
Medições		1	2	3
Rugosidade média (Ra)	Sem revestimento	0,29	0,272	0,303
	Com revestimento	0,631	0,601	0,665

Tabela 4 – Medições de rugosidade comparando as duas ferramentas utilizadas nos ensaios

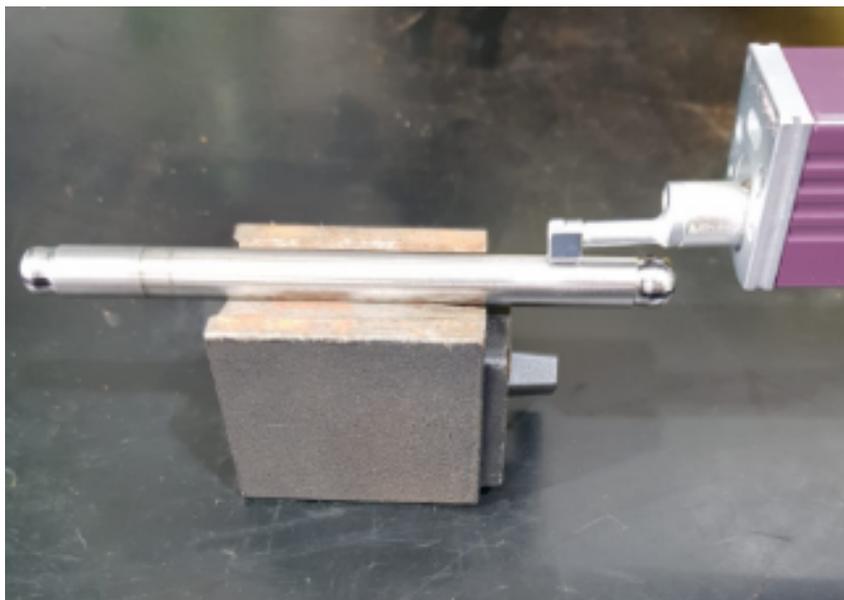


Figura 20 – Medição Rugosidade Ferramenta
Fonte:Autorial.

4.2 Resultados da ANOVA

As Tabelas 5, 6 e 6 a seguir, mostram os valores obtidos na análise de variância dos ensaios realizados. A Análise de Variância (ANOVA) é uma técnica estatística amplamente utilizada para comparar as médias de três ou mais grupos, com o objetivo de determinar se existem diferenças estatisticamente significativas entre eles. Desenvolvida por (FISHER, 1935), a ANOVA é fundamental em estudos que envolvem variáveis quantitativas, pois permite separar a variabilidade causada por fatores específicos (variáveis independentes) daquela que ocorre ao acaso, fornecendo resultados robustos e confiáveis.

A ANOVA calcula o F-valor, que representa a razão entre a variabilidade entre os grupos e a variabilidade dentro dos grupos. Se o p-valor associado ao F-valor for menor que o nível de significância (geralmente 0,05), rejeita-se a hipótese nula, indicando que pelo menos uma média é significativamente diferente. Além disso, a ANOVA pode ser estendida para avaliar múltiplos fatores (*ANOVA Two-Way*) e efeitos ao longo do tempo (*ANOVA de Medidas Repetidas*), sendo amplamente aplicada em áreas como engenharia, ciências biológicas, educação e saúde. Dessa forma, a ANOVA fornece uma base sólida para a interpretação de dados experimentais, permitindo conclusões mais precisas e embasada.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-p	F crítico
Entre grupos	0,1225125	1	0,1225125	0,4019714	0,5494649	5,987377607
Dentro dos grupos	1,828675	6	0,3047792			

Tabela 5 – ANOVA Ângulo

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-p	F crítico
Entre grupos	0,9316125	1	0,9316125	5,4823578	0,0577299	5,987377607
Dentro dos grupos	1,019575	6	0,1699292			

Tabela 6 – ANOVA Passo

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-p	F crítico
Entre grupos	0,7875125	1	0,7875125	4,0604765	0,0905174	5,987377607
Dentro dos grupos	1,163675	6	0,1939458			

Tabela 7 – ANOVA Revestimento

Tabela 8 – Resultados da ANOVA para Ângulo, Revestimento e Passo

Variável	Valor-p	Conclusão
Ângulo	0,549	Não há diferença significativa.
Revestimento	0,090	Não há diferença significativa, mas houve alterações nos valores.
Passo	0,057	Tendência de diferença, próximo do limiar de 5%.

Com base na análise de variância (ANOVA) realizada, foram avaliadas as variáveis **Ângulo**, **Revestimento** e **Passo**. A Tabela 8 apresenta os valores-p obtidos e as respectivas conclusões. Observa-se que a variável **Passo** apresentou um valor-p próximo ao limiar de significância de 5%, indicando uma maior influência que as demais variáveis no resultado de rugosidade média.

4.3 Resultados Encontrados diante das imagens do estereomicroscópio e *MountainsMap*

Apesar de todos os valores de Rugosidade Média encontrados, ao observar as imagens 21 e 22 capturadas através do estereomicroscópio e registrada em estudo no software *MountainsMap*, pode-se ver que os ensaios realizados com a ferramenta revestida obtiveram uma textura característica mais homogênea, entregando um acabamento superficial melhor quando comparado a figura que representa o resultado dos ensaios de estampagem da ferramenta sem revestimento.

A análise dos resultados revelou dois aspectos aparentemente contraditórios, mas que podem ser explicados pela natureza distinta das medições realizadas. Por um lado, as imagens capturadas pelo microscópio e analisadas no software *MountainsMap*®, mostradas nas Figuras 21 e 22, indicaram que a ferramenta revestida de CrAlN proporcionou uma textura superficial mais homogênea e um acabamento visualmente superior em compara-

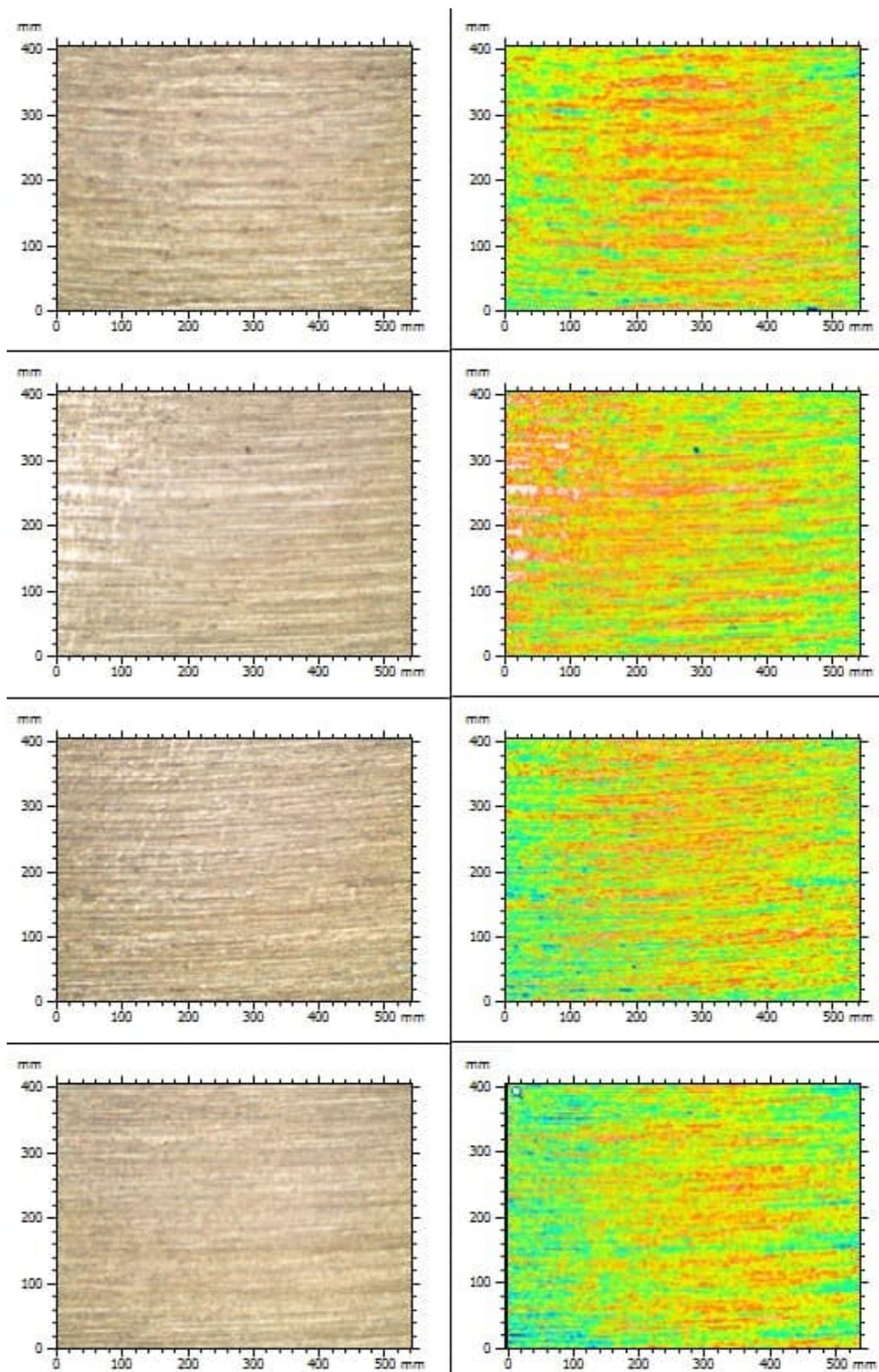


Figura 21 – Imagens Microscópio ensaios com ferramenta com revestimento
Fonte: Autoral.

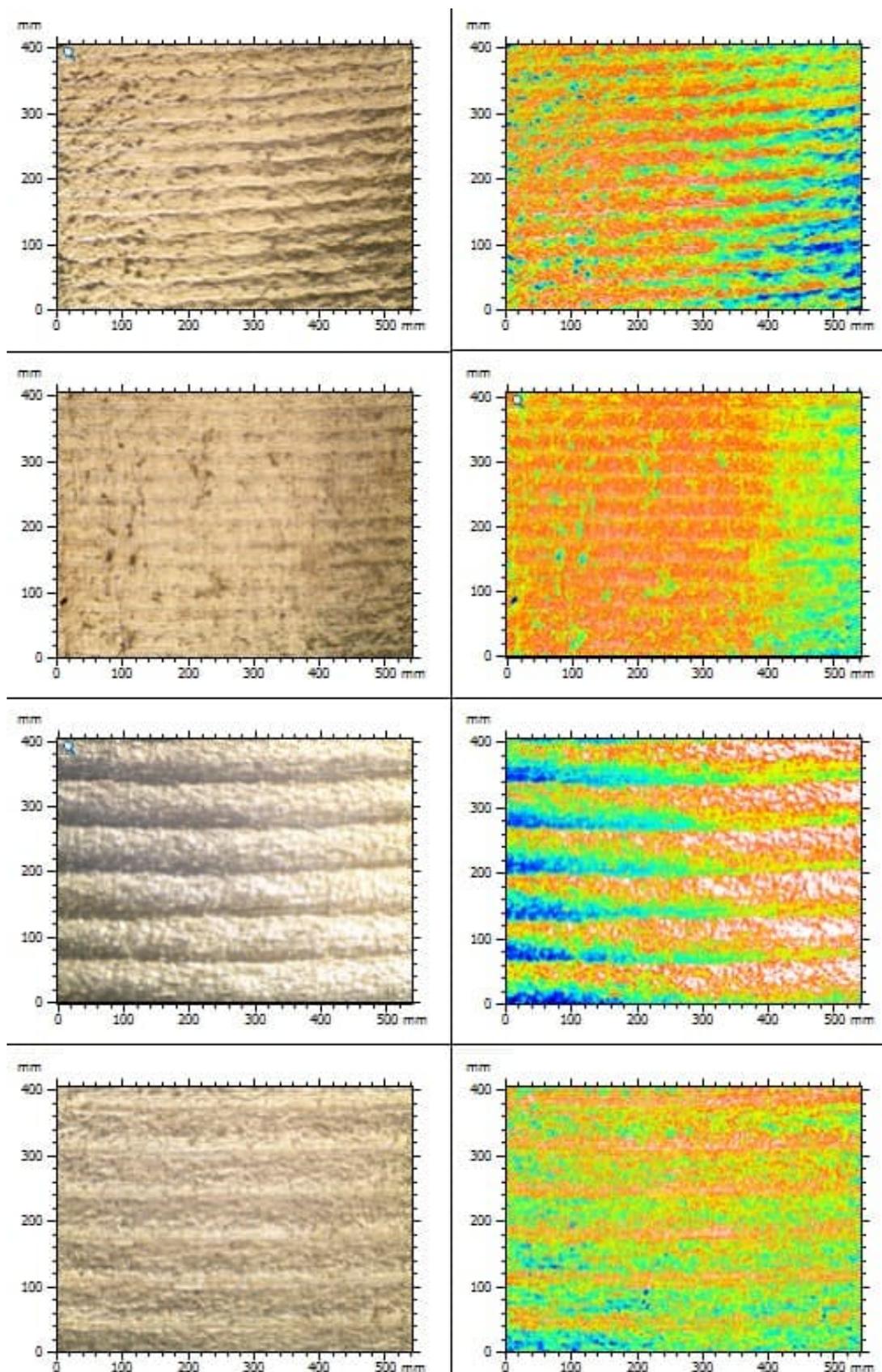


Figura 22 – Imagens Microscópio ensaios com ferramenta sem revestimento
 Fonte: Autoral.

ção com a ferramenta sem revestimento. Essa homogeneidade pode estar relacionada à distribuição mais uniforme das marcas de usinagem e à menor presença de irregularidades grosseiras na superfície estampada.

Por outro lado, os valores de rugosidade média (Ra) medidos nas Figuras 18, 19, 16 e 17 mostraram que a ferramenta revestida apresentou uma rugosidade média maior (0,63 μm) em comparação com a ferramenta sem revestimento (0,29 μm). Essa aparente contradição pode ser explicada pelo fato de que a rugosidade média (Ra) é uma medida quantitativa que captura a amplitude média das irregularidades superficiais, enquanto a homogeneidade observada nas imagens está relacionada à distribuição espacial dessas irregularidades. A ferramenta revestida, apesar de gerar uma superfície com maior rugosidade média, produziu uma textura mais consistente e uniforme, o que pode ser vantajoso em aplicações onde a distribuição das marcas superficiais é mais crítica do que a amplitude absoluta das irregularidades.

Portanto, os resultados sugerem que a ferramenta revestida de CrAlN, embora aumente a rugosidade média (Ra), promove uma textura superficial mais controlada e homogênea, o que pode ser benéfico para certas aplicações que exigem um acabamento superficial mais uniforme, mesmo com valores de rugosidade ligeiramente superiores.

5 Conclusão

O artigo explora a estampagem incremental de chapas de alumínio 1100 aplicando planejamento fatorial 2^2 com variação do passo vertical da ferramenta e do ângulo de parede da peça conformada com medição da rugosidade média (R_a) da superfície conformada. As conclusões da investigação proposta são as seguintes:

- O método de estampagem incremental de ponto simples (SPIF) utilizando um centro de usinagem CNC com três eixos é eficaz, e se mostrou viável e satisfatório para aplicação na chapa de alumínio 1100 com espessura de 0,5 mm;
- O aumento do ângulo de parede melhorou o acabamento da peça estampada com a diminuição da rugosidade;
- As análises obtidas pelo planejamento fatorial 2^2 , utilizando como fatores o passo e o ângulo de parede, mostraram que a variação do passo é muito mais influente na superfície da peça do que a variação do ângulo de parede e revestimento da ferramenta, indicando que se trabalha melhor a superfície com passos menores, porém o tempo de execução aumenta consideravelmente nesses casos. Também pode se verificar que, o uso de revestimento não se mostrou eficaz para os parâmetros utilizados, elevando o nível de rugosidade média.
- Os resultados da ANOVA revelam que o passo vertical foi o parâmetro mais significativo para os ensaios propostos.

Referências

- CALLISTER, W.; SOARES, S. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Livros Técnicos e Científicos, 2008. ISBN 9788521615958. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=R3BwPgAACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- CASTELAN, J. *ESTAMPAGEM INCREMENTAL DO TITÂNIO COMERCIALMENTE PURO PARA APLICAÇÃO EM IMPLANTE CRANIANO*. 2010. Citado 6 vezes nas páginas 15, 17, 22, 24, 25 e 26.
- CESARO, L. C. de. *PARÂMETROS DE CONFORMAÇÃO PARA A ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L*. 2010. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 23.
- DALEFFE, A. *ESTUDO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE ALUMÍNIO PURO*. 2008. Citado na página 27.
- FAQUIM, L. D. *ANÁLISE DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM PLACAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L*. 2020. Citado na página 13.
- FISHER, R. A. *The design of experiments*. Oliver and Boyd, Edinburgh, 1935. ISBN 978-0-02-844690-5. Citado na página 41.
- 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*. 2014. Citado na página 25.
- GOHIL, A.; MODI, B. Experimental determination of fracture forming line for aa1100 aluminum sheet in single point incremental forming process. *MATERIAL TODAY: PROCEEDINGS*, Elsevier BV, 6 2023. ISSN 22147853. Citado na página 14.
- JESWIET, J. et al. *ASYMMETRIC SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING OF SHEET METAL*. 2005. Citado 5 vezes nas páginas 17, 18, 20, 21 e 24.
- KUMAR, A. Critical state-of-the-art literature review of surface roughness in incremental sheet forming: A comparative analysis. *Applied Surface Science Advances*, Elsevier B.V., v. 23, 9 2024. ISSN 26665239. Citado na página 37.
- MACHADO, A. et al. *Teoria Da Usinagem Dos Materiais*. EDGARD BLUCHER, 2009. ISBN 9788521204527. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=juiTPgAACAAJ>>. Citado na página 30.
- MARTIN, S. *RAPID PROTOTYPING BY SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING OF SHEET METAL: PHD PROJECT*. [S.l.]: Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, 2008. ISBN 9788789502816. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- MATEUS, V. V. G. *ESTUDO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPAS DE AÇO AISI 430*. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 15, 30 e 31.

- MATEUS, V. V. G. Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de aço aisi 430. 2018. Citado na página 37.
- MICARI, F.; AMBROGIO, G.; FILICE, L. Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: State of the art and future trends. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 191, p. 390–395, 8 2007. ISSN 09240136. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- NASCIMENTO, A. do. Tcc 2 andré do nascimento delgado. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- OLIVEIRA, B. J. *FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS EM CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 304 UTILIZANDO O MÉTODO DE ESTAMPAGEM*. 2018. Citado na página 13.
- PHAM, D. T. et al. *Intelligent Production Machines and Systems The Effect of the Punch Radius in Dieless Incremental Forming*. 2006. Citado na página 19.
- SENA, J. I. V. de. Estampagem incremental, um novo conceito de produção. *Engenharia Mecânica*, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 27.
- SILVA, M. B.; BAY, N.; MARTINS, M. S. and P. A. Theory of single point incremental forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 57, p. 247–252, 2008. ISSN 00078506. Citado 5 vezes nas páginas 16, 23, 25, 28 e 39.
- SILVA, P. J. da. *ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES: UMA ANÁLISE DE CONFORMABILIDADE BASEADA EM MEDIÇÃO DE FORÇA, DESGASTE DE FERRAMENTA E AQUECIMENTO*. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- ZHOU, S.; QIU, Z.; ZENG, D. Deformation mechanisms and crack routes of craln coatings. *Materials Characterization*, Elsevier Inc., v. 167, 9 2020. ISSN 10445803. Citado na página 29.