

BRUNO JOSÉ OLIVEIRA

**FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS EM CHAPAS DE AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 304 UTILIZANDO O MÉTODO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL**



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

2018

BRUNO JOSÉ OLIVEIRA

**FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS EM CHAPAS DE AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 304 UTILIZANDO O MÉTODO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como sendo um requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de fabricação

Orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales

**UBERLÂNDIA - MG
2018**

BRUNO JOSÉ OLIVEIRA

**FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS EM CHAPAS DE AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 304 UTILIZANDO O MÉTODO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como sendo um requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wisley Falco Sales / (Orientador)

MSc Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Prof. Dr. Éder Silva Costa

UBERLÂNDIA, 29 de junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e a toda minha família, em especial meus pais Simone e Rogério pela incentivo, auxílio e carinho por todos esses anos estando sempre presentes e sendo minha fonte de inspiração e conforto nas horas difíceis. Um agradecimento carinhoso as minhas avós Maria e Tânia pelo amor, apoio e fraternidade durante toda essa jornada. Agradeço também à minha irmã Arielly pelo companheirismo e auxílio durante esse período e agradeço à minha noiva Camila pelo apoio e dedicação durante esses anos.

Agradeço a todos os membros do Laboratório de pesquisa e ensino em Usinagem (LEPU) por todo suporte. Um agradecimento em especial aos senhores Leonardo Rosa, Cláudio Gomes e companheiros de laboratório pelos ensinamentos, apoios e todas as experiências compartilhadas.

Meus cordiais agradecimentos ao meu orientador Wisley Sales, por todos os ensinamentos e orientações tanto acadêmicas quanto profissionais, além da amizade que levarei por toda vida.

E por fim, agradeço a todos meus amigos e companheiros de curso durante minha trajetória na Universidade Federal de Uberlândia, que contribuíram direta e indiretamente com minha aprendizagem e desenvolvimento pessoal e profissional. Em especial agradeço aos meus amigos Vitor Petrucci, Victor Hugo, Filipe Borges, Alexsia Mota, Jean Cunha e Alexander Machado, que além de companheiros durante toda minha jornada se tornaram grandes amigos pessoais.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar e caracterizar o comportamento de uma chapa de aço AISI 304 com espessura de 0,5 mm para o processo de Estampagem Incremental de Chapas (ISF – *Incremental Sheet Forming*). Foram realizados cinco ensaios onde o primeiro foi dedicado a um pré-teste para definição de parâmetros. Basicamente foi empregado a um dispositivo de fixação de chapas, um centro de usinagem CNC e um *software* de CAD/CAM. Durante os ensaios, o avanço (v_f) [mm/min] foi adotado como variável de estudo no processo, mantendo constantes a lubrificação, ferramenta de estampagem, geometria da cavidade estampada e rotação (n) [rpm]. Foram realizados testes de tração para evidenciar algumas propriedades do aço, medições de rugosidade e análise metalográfica nas superfícies das chapas estampadas antes e depois dos experimentos. Os ensaios experimentais mostraram que o aço apresenta boa conformabilidade para avanços mais altos e, que se faz necessária a utilização de lubrificação mais específica para obter melhor acabamento superficial.

Palavras-chave: Aço AISI 304, Deformação, Estampagem Incremental.

ABSTRACT

This work aims to evaluate and characterize the behavior of an AISI 304 steel sheet with a thickness of 0.5 mm for the Incremental Sheet Forming (ISF) process. Five trials were carried out where the first one was dedicated to a pre-test for parameter definition. It was basically used for a sheet fastening device, a CNC machining center and CAD/CAM software.

During the tests, the advance (v_f) [mm/min] was adopted as a study variable in the process, keeping constant the lubrication, stamping tool, stamped cavity geometry and rotation (n) [rpm]. Traction tests were performed to show some steel properties, roughness measurements and metallographic analysis on the surfaces of stamped plates before and after the experiments. The experimental tests showed that the steel presents good formability for higher advances and that it is necessary to use more specific lubrication to obtain a better surface finish.

Keywords: AISI 304 steel, Deformation, Incremental Sheet Forming.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABREVIATURAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISF	–	Incremental Sheet Forming
CNC	–	Comando Numérico Computadorizado
CAD	–	Computer Aided Design
CAM	–	Computer Aided Manufacturing
CLC	–	Curvas Limite de Conformação
LEPU	–	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
VGA	–	Video Graphics Array
AISI	–	American Iron Steel Institute.

SÍMBOLOS

v_f	[mm/min]	–	Velocidade de avanço
n	[rpm]	–	Rotação
F	[N]	–	Carga instantânea aplicada ao corpo de prova no ensaio de tração
l_0	[mm]	–	Comprimento inicial do corpo de prova
l	[mm]	–	Comprimento instantâneo do corpo de prova
A_0	[mm ²]	–	Área inicial
Δl	[mm]	–	Varição do alongamento do corpo de prova
σ	[MPa]	–	Tensão de engenharia
ε	[%]	–	Deformação
r		–	Índice de anisotropia ou coeficiente de Lankford
b_0	[mm]	–	Largura inicial do corpo de prova
b	[mm]	–	Largura instantânea do corpo de prova
Δr		–	Anisotropia planar.
rm		–	Anisotropia média.
CFC		–	Estrutura molecular cúbica de face centrada.
R_a	[μ m]	–	Rugosidade aritmética média
R_q	[μ m]	–	Rugosidade quadrática média
R_z	[μ m]	–	Rugosidade singular
L_m		–	Comprimento de amostragem (cutoff)
ΔZ	[mm]	–	Incremento no eixo de coordenada z da máquina CNC
D	[mm]	–	Diâmetro
ΔT		–	Varição de temperatura em um determinado período.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplificação dos processos de conformação. Fonte: Chiaverini, 1986.....	4
Figura 2.2 – Estampagem do copo com diversos estados de tensões. Fonte: Souza, 1982.....	5
Figura 2.3 – Representação esquemática do Ensaio Erichsen. Fonte: Souza, 1982.....	6
Figura 2.4 – Representação do ensaio de tração, onde se aplica uma carga F ocasionando um alongamento na peça. Fonte: Callister, 1999.....	8
Figura 2.5 – Representação esquemática de um ensaio de tração. Fonte: Callister, 1999.....	9
Figura 2.6 – Representação de uma curva tensão x deformação, exemplificando o estreitamento do corpo de prova a partir do limite de resistência a tração M, até a sua ruptura F. Fonte: Callister, 1999.....	11
Figura 2.7 – Curva tensão deformação dos aços inoxidáveis austeníticos evidenciando os aços AISI 301 e 304 - Fonte: Silva, 1988.....	13
Figura 2.8 – Representação do parâmetro R_a Fonte: Bet, 1999.....	15
Figura 2.9 – Representação do parâmetro R_z , Fonte: KÖNIG, 1981.....	16
Figura 2.10 – Processo esquemático de estampagem incremental. Sendo Δ_z = Profundidade do passe vertical, Ψ = Ângulo de inclinação da parede da chapa, S_0 =Espessura inicial da chapa, S_1 = Espessura final da chapa e λ = ângulo do semi-cone. Fonte: Daleffe, 2014.....	17
Figura 2.11 – Representação da execução do processo de estampagem incremental. Fonte: B. Lu, 2014.....	18
Figura 3.1 – Esquema chapa utilizada, sendo TO destinada ao pré-teste, T1- teste 1, T2- teste 2, T3- teste 3, T4- teste 4.....	20
Figura 3.2 – Detalhe das amostras retiradas de uma chapa com dimensões 240 x 240 mm destinadas para os ensaios de tração.....	21
Figura 3.3 – Dimensões padronizadas destinadas ao corpo de prova para os testes de tração.....	21
Figura 3.4 – Fratura do corpo de prova após o teste de tração.....	22
Figura 3.5 – Esquema de ligação dos testes de estampagem incremental, sendo 1 – centro de usinagem CNC, 2 – Cabo de ligação VGA, 3 – Monitor de comandos e transmissão dos pacotes de dados.....	23
Figura 3.6 – Suporte de fixação da chapa (peça), sendo: 1 – Base da máquina CNC (Discovery 760); 2 – Colunas de sustentação dos esforços; 3 – Furos de fixação da chapa; 4 – Chapa (peça); 5 – Ferramenta de conformação. Gerada através do Software Solidworks.....	24.
Figura 3.7 – ilustração do suporte de fixação das chapas AISI 304.....	24
Figura 3.8 – Ferramenta utilizada nos testes de estampagem incremental.....	25
Figura 3.9 – Projeto da geometria corpo de cone.....	26
Figura 3.10 – Representação tridimensional da geometria em análise. Gerada através do Software Fusion 360®.....	26
Figura 3.11 –Foto do ensaio de estampagem de chapa de aço inoxidável AISI 304.....	27
Figura 3.12 – Amostras após o embutimento e destinadas à análise metalográfica.....	27
Figura 3.13 – Representação do local de obtenção das amostras após os testes (a); (b) dimensões dos corpos de prova.....	28
Figura 4.1 – Gráfico de tensão normal (σ) por deformação relativa (ϵ) na direção 0°	29
Figura 4.2 – Peça produzida após pré-teste (Corpo de Pirâmide)	31
Figura 4.3 – Geometria estampada após teste 1.....	31
Figura 4.4 – Geometria estampada após teste 2.....	32
Figura 4.5 – Representação da trinca propagada na superfície do teste 2.....	32

Figura 4.6 – Representação da ampliação da trinca propagada na superfície do teste 2.....	33
Figura 4.7 – Representação da cavidade obtida após o teste 3.....	33
Figura 4.8 – Representação da cavidade obtida após o teste 4.....	34
Figura 4.9 – Desgaste da ferramenta associado ao avanço no processo de estampagem incremental. Legenda: (a) ponta da ferramenta após o teste 3; (b) ponta da ferramenta após o teste 4.....	35
Figura 4.10 – Gráfico representativo dos valores dos parâmetros de rugosidade Ra (μm).....	36
Figura 4.11 – Análise metalográfica chapa de aço AISI 304, não submetida ao processo de estampagem incremental.....	37
Figura 4.12 – Análise metalográfica após os testes de estampagem incremental; (a) Teste 1; (b) Teste 2.....	37
Figura 4.13 – Análise metalográfica após os testes de estampagem incremental; (c) Teste 3 e (d) Teste 4.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades Típicas dos aços inoxidáveis austeníticos recozidos ou solubilizados.....	14
Tabela 3.1 – Parâmetros de testes.....	22
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304 obtidas pelo ensaio de tração realizado em três direções.....	30
Tabela 4.2 – Relação do avanço e o tempo de ensaio com a profundidade do cone obtida.....	34

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo Geral.....	2
1.2. Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Conformação dos Metais	3
2.2. Estampagem Profunda de Chapas.....	5
2.3. Ensaios de Estampabilidade.....	6
2.3.1. Ensaio de tração.....	6
2.3.2. Ensaio Erichsen	6
2.3.3. Ensaio Olsen	7
2.3.4. Ensaio clc (curvas limite de conformação)	7
2.4. Propriedades Mecânicas do Material	8
2.4.1. Conceitos de tensão e deformação.....	8
2.4.2. Ensaios de tração	9
2.4.3. Obtenção de Tensão (σ) x Deformação (ϵ).....	9
2.4.4. Deformação plástica	10
2.5. Coeficiente de Anisotropia	11
2.6. Aço Inoxidável Austenítico 304	12
2.6.1. Composição química	13
2.7. Metalografia.....	14
2.7.1. Técnica metalográfica	14
2.8. Rugosidade.....	15
2.8.1. Parâmetro (R_a)	15
2.8.2. Parâmetro (R_z)	16
2.8.3. Parâmetro (R_q)	16
2.9. Estampagem Incremental.....	17
CAPÍTULO III: METODOLOGIA	20
3.1. Estampagem Incremental.....	20
3.2. Ensaio de Tração.....	20
3.3. Parâmetro de Testes	22
3.4. Procedimento Experimental.....	23
3.4.1. Suporte de fixação	24
3.4.2. Ferramenta de estampagem	25
3.5. Projeto da Geometria de Teste	25

3.6. Obtenção dos Dados para Análise de Rugosidade e Metalografia	27
CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1. Teste de Tração	29
4.2. Análise Geométrica.....	30
4.2.1. Teste 0	30
4.2.2. Teste 1	31
4.2.3. Teste 2	32
4.2.4. Teste 3	33
4.2.5. Teste 4	33
4.2. Avaliação da Rugosidade Superficial	35
4.3. Análise Metalográfica	36
CAPÍTULO V: CONCLUSÃO	39
CAPÍTULO VI: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXO I.....	43
APÊNDICE I.....	44
APÊNDICE II.....	46

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O processo de conformação mecânica são processos de fabricação que utilizam a deformação plástica para obtenção do produto final, onde se mantem o volume e conserva-se a massa do material em todo o processo. Consequentemente o processo de conformação altera tanto a geometria do material a ser trabalhado quanto suas propriedades mecânicas.

Com o desenvolvimento tecnológico e alta competitividade no mercado, necessita-se cada vez mais de uma maior especialização e domínio nos processos de fabricação de peças com geometrias complexas, onde geralmente se utiliza processos convencionais como metalurgia do pó e estampagem, no qual é utilizado matrizes. Este processo é viável para indústrias que utilizam da vasta demanda de produção onde o alto custo dessas matrizes e diluído no grande número de peças, já para processos de baixa produção essas matrizes de conformação se tornam inviáveis devido ao auto custo envolvido.

Seguindo essa linha para a produção de uma demanda de pequenos lotes de peças pode-se destacar uma técnica de conformação que vem ganhando espaço no mercado, a estampagem incremental (ISF-Incremental Sheet Forming), por não necessitar da utilização de matrizes para obtenção de peças ou de protótipos, o que se equipara em relação aos processos de estampagem convencional, devido ao baixo custo do ferramental. O processo de estampagem incremental segundo Kim (2002), e a utilização de uma ferramenta confeccionada a partir de uma geometria simples onde a mesma executa incrementos contra uma chapa metálica ocasionando sucessivas deformações, conformando o material no final do processo.

O presente trabalho busca evidenciar a influência da variação do avanço no processo de estampagem incremental utilizando uma chapa de aço inoxidável AISI 304, o trabalho contém o embasamento teórico utilizado disposto pela revisão bibliográfica, as variáveis envolvidas no processo assim como toda a metodologia utilizada para a confecção dos testes, seguindo dos resultados obtidos e por fim apresentando a conclusão.

1.1. Objetivo Geral

Estudar e analisar o processo de estampagem incremental em chapa de aço inoxidável AISI 304 com 0,5 mm de espessura utilizando uma ferramenta esférica.

1.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a influência do avanço da ferramenta de conformação na qualidade do acabamento das peças produzidas;
- Investigar a influência dos parâmetros adotados a nível microestrutural das chapas após o processo de estampagem incremental;
- Avaliar o desgaste ocasionado durante o processo de estampagem incremental na ponta semiesférica da ferramenta de conformação da chapa de aço inoxidável AISI 304.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado e caracterizado o processo de estampagem incremental, assim como todos os assuntos importantes que fundamentam todo o estudo técnico utilizado neste trabalho, tanto como, conformação dos metais, ensaio de estampabilidade, conceitos básicos de tensão deformação, propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304, metalografia, rugosidade.

2.1. Conformação dos Metais

Segundo Bresciani (2011), entende-se como processo de conformação de corpos metálicos, toda técnica de modificação da forma física do corpo metálico para outra forma definida. É possível classificá-los em dois grandes grupos, tais como, processos que mudam a forma do material por aplicação de tensões externas e em processos metalúrgicos, onde geralmente o material a ser conformado se encontra em sua forma líquida necessitando de elevadas temperaturas, um exemplo é a fundição de metais. O método de conformação utiliza de forças externas para deformar o corpo metálico, as tensões impostas a esses materiais são inferiores ao limite de resistência a ruptura do material conformado e são processos que trabalham dentro da fase plástica.

Essas deformações causam concentrações de tensão que, se não forem bem monitoradas e trabalhadas abaixo do limite de escoamento do material, podem levar a peça à fratura. Os processos de conformação podem ser classificados também de acordo com a diferenciação dos esforços que se aplica no material, exemplificado na Fig. 2.1. Segundo Chiaverini (1986), eis alguns exemplos:

- Processos de compressão direta
- Processos de compressão indireta
- Processos de tração
- Processos de dobramento
- Processo de cisalhamento

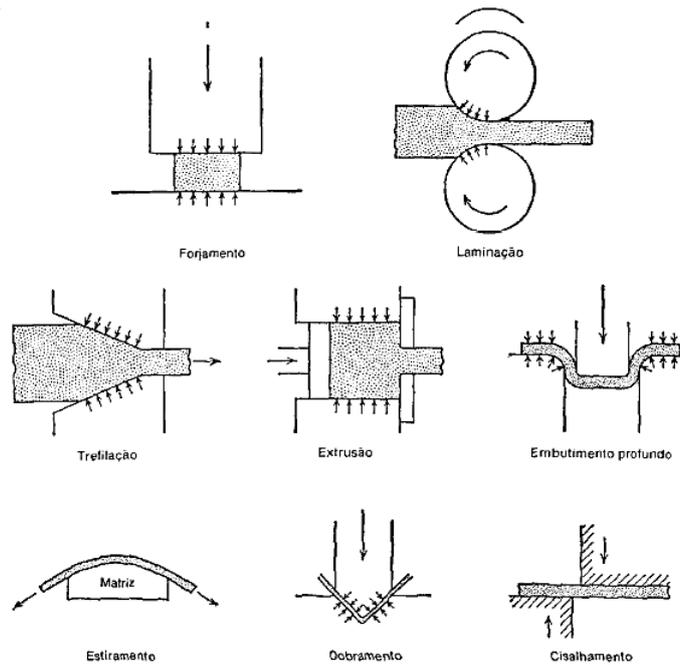


Figura 2.1 – Exemplificação dos processos de conformação (Chiaverini, 1986)

De acordo com Chiaverini (1986), é possível classificar o processo de conformação em trabalho a quente e a frio, havendo vantagens e desvantagens no processo. O trabalho a quente implica em menor esforço mecânico, ocorre uma melhora nas propriedades do material destacando-se a tenacidade, o aumento da resistência e a dureza e, por consequência, diminui a ductilidade, em alguns casos isso pode ser viável, mas há casos em que se faz necessário uma maior ductilidade e, para isso deve-se submeter a peça ao recozimento para eliminar tais propriedades. No trabalho a quente pode-se citar algumas desvantagens devida a elevadas temperaturas que são submetidas as chapas, causando oxidação e formação de casca de óxidos, o que podem ocasionar falhas.

O trabalho a frio resulta em um melhor acabamento superficial, ocorre encruamento na peça devido a grandes esforços que esmagam os grãos dando origem a anomalias que devem ser evitadas, denominadas casca de laranjas. É relacionada ao tamanho do grão que é esmagado quando submetido a estampagem, caracterizada por uma superfície extremamente rugosa em que essa irregularidade permanece visível mesmo após o recobrimento da chapa como por exemplo, por meio de tintas.

Na estampagem em geral, as peças a serem fabricadas se originam a partir de simples lingotes, ou chapas a serem dobradas, podendo ser até mesmo discos que ganharão formas, como as tampas de garrafas de cervejas.

Essas dobras efetuadas em inúmeras regiões ocasionam diversos estados de tensões, o que dificulta a obtenção do esforço resultante na peça por isso e tão necessário o estudo dos esforços nos pontos críticos para evitar a fratura da peça durante a conformação. Segundo Bresciani (2011) de uma maneira bem sucinta a peça que passará por um processo de dobramento estará sujeita a forças de tração, compressão e flexão que será realizado até a deformação plástica do material sendo este o esforço predominante no processo.

2.2. Estampagem Profunda de Chapas

Para uma estampagem com o intuito de obter como peça final um copo, utiliza-se uma matriz circular que estará submetido à punção no centro, que deforma a chapa no sentido longitudinal, ao mesmo tempo a aba movimentada em direção do movimento, mesmo estando submetida ao sujeitador, Fig 2.2. Durante o processo, o disco sofre uma redução circunferencial nas abas a medida que o movimento se desenvolve. Nessa determinada região existem forças que atuam no sentido tangencial dos círculos concêntricos ao centro da peça, denominado compressão circunferencial.

Determinação das regiões do processo:

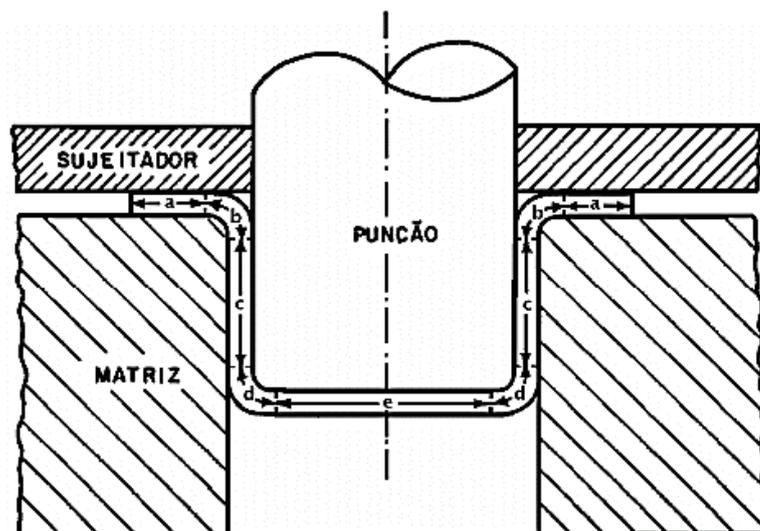


Figura 2.2 – Estampagem do copo com diversos estados de tensões. (SOUZA, 1982)

a = abas do copo, b = dobra da matriz, c = lateral do copo, d = dobramento do punção, e = região no fundo do copo. Onde, o volume do disco é igual ao volume do copo.

2.3. Ensaio de Estampabilidade

Estampabilidade é a possibilidade de a chapa metálica aderir a matriz de formação da geometria final da peça, sem apresentar nenhum tipo de defeitos sejam eles de forma ou de superfície. Por tanto deve-se fazer ensaios de estampabilidade que preveem o comportamento desses materiais. Este ensaio é feito a partir do estiramento do corpo de prova até a obtenção de defeitos, a partir desses defeitos é feita a análise com base de parâmetros geométricos (Kobayashi, 1989).

Os principais tipos de ensaios de estampabilidade são:

2.3.1. Ensaio de tração

Consiste no alongamento do corpo de prova, sendo o mesmo retangular para ensaios de estampabilidade, a deformação é feita de 15% a 20% da forma inicial, o corpo de prova é fixado pelas extremidades e sujeito a uma carga graduada ao longo do tempo sendo obtido a deformação desejada, interrompe o ensaio e realiza a avaliação de medição.

2.3.2. Ensaio Erichsen

O ensaio Erichsen, representado pela Fig 2.3 tem como princípio estirar uma amostra de formato de disco até o surgimento de uma falha no corpo de prova (trinca), então é medido a profundidade da calota formada em milímetros, onde esse valor representa o índice de ductilidade Erichsen (IE) (SOUZA, 1982).

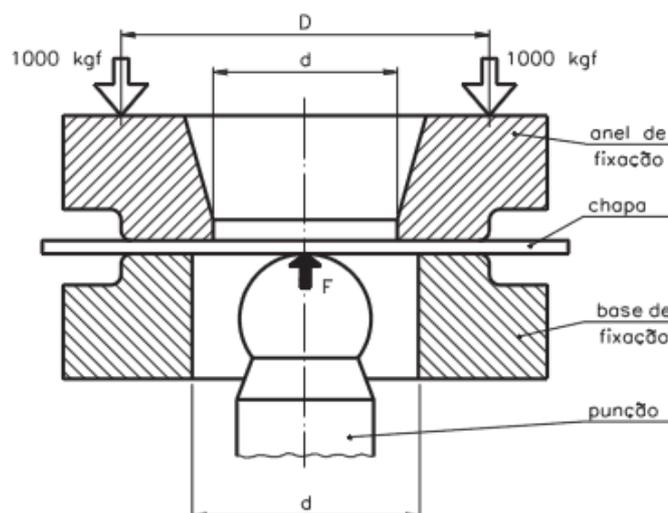


Figura 2.3 – Representação esquemática do Ensaio Erichsen. (SOUZA, 1982)

É fixado a matriz metálica entre a base de fixação e o anel de fixação sujeito a uma carga de 1000 Kgf. O punção tem um diâmetro de 20 mm e é lubrificado por uma graxa grafitada, o resultado do ensaio é proporcionalmente relacionado a espessura da chapa que está sujeita ao processo.

2.3.3. Ensaio Olsen

O ensaio Olsen é semelhante ao Erichsen, ocorre variação apenas quanto as dimensões do punção utilizado de 22 mm de diâmetro. O corpo de prova é em formato de disco e durante os ensaios são monitorados constantemente a carga e a altura da calota formada. O índice de ductilidade Olsen é obtido pela altura do copo, em milésimos de polegada, no momento em que a carga começa a cair.

2.3.4. Ensaio CLC (Curvas Limite de Conformação)

Para a obtenção dessas curvas CLC não existem normas correspondentes para o tratamento e a padronização desse método, portanto se dá em busca de um ensaio que padronize e que seja eficaz para os diversos métodos e materiais que serão submetidos a estampabilidade.

A obtenção dessas curvas se tem importância pois segundo Sampaio et al., (2003) é uma forma de relacionar o limite de conformação do material obtido experimentalmente com ensaios mecânicos com a realidade encontrada na indústria onde é de suma importância conhecer o comportamento do material a ser estampado para uma melhor conformabilidade e consequentemente um excelente resultado final da chapa estampada, é possível obter toda essa informação através do ensaio CLC.

Para a obtenção eficaz dessas curvas CLC, Richter (2003), cita que os métodos mais utilizados para esse processo são os ensaios de Marciniak que se faz uso de um punção cilíndrico e Nakazima que utiliza um punção esférico para obtenção dos resultados experimentais.

2.4. Propriedades Mecânicas do Material

2.4.1. Conceitos de tensão e deformação

O estudo das propriedades mecânicas dos materiais é de suma importância para qualquer processo de fabricação, pois auxilia no entendimento do processo que está sendo empregado além de compreender como esse determinado material irá se comportar durante a sua solicitação, no qual conhecendo suas características e suas propriedades mecânicas o fazem resistir a esforços de forças ou cargas, e caso ultrapassem a resistência do mesmo podem levá-lo a fratura. Um material comportado mecanicamente reflete a solicitação imposta, seja a uma carga ou força, em que o material imposto fornece uma resposta de deformação aos esforços aplicados. Pode-se citar algumas propriedades importantes como a resistência, a dureza, a ductilidade e a rigidez, que são verificadas através de experimentos executados em laboratórios.

Para a execução deste trabalho, serão feitos ensaios com corpos de prova de aço inoxidável austenítico 304, com o objetivo de se obter a curva de tensão x deformação para o material utilizado. Será realizado um ensaio de tração esquematizado na Fig. 2.4 para obtenção da curva.

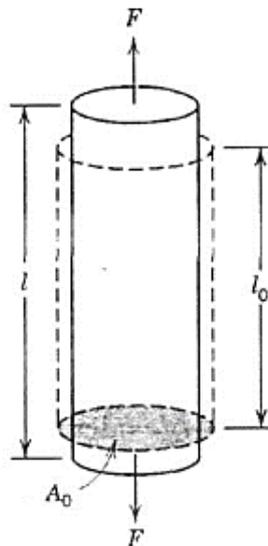


Figura 2.4 – Representação do ensaio de tração, onde se aplica uma carga F ocasionando um alongamento na peça. (CALLISTER, 1999)

Segundo Callister (1999), devido a uma carga estática aplicada ou sendo alterada lentamente ao longo do tempo, aplicada uniformemente sobre uma seção reta de um corpo de prova, o comportamento mecânico será verificado mediante a um ensaio de tensão x

deformação. Geralmente esses ensaios são realizados a temperatura ambiente e essa carga pode ser aplicada de três formas diferentes: tração, compressão e cisalhamento.

2.4.2. Ensaio de tração

O ensaio de tração é o mais comumente realizado em trabalhos de pesquisas e também em fábricas, devido a sua facilidade de realização e eficiência de resultados a serem analisados. Consiste em deformar uma amostra até sua ruptura por uma aplicação da carga de tração gradativamente aplicada uniaxial ao eixo maior da peça. O corpo de prova utilizado geralmente é de formato circular, no qual o mesmo é alongado a partir de uma barra móvel que se move em relação a uma fixa paralela, como representado na Fig. 2.5, extensômetros são fixados no corpo de prova, que medem respectivamente a carga aplicada e o alongamento do corpo de prova ao longo do tempo.

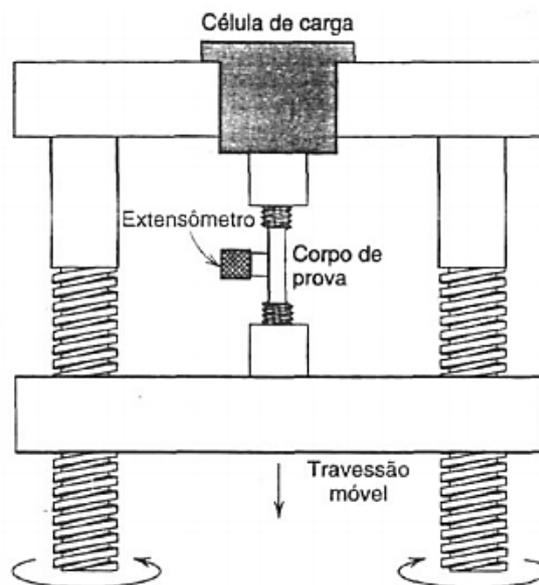


Figura 2.5 – Representação esquemática de um ensaio de tração.
(Callister, 1999)

2.4.3 Obtenção de Tensão (σ) x Deformação (ϵ)

A obtenção da carga em relação a deformação é diretamente proporcional ao tamanho da amostra, ou seja, se a área da seção reta for duas vezes maior, conseqüentemente a força requerida para deformação também deverá ser dobrada para produzir uma deformação equivalente. Por isso se utiliza um padrão de normalização para reduzir os fatores geométricos

manuseando os seguintes parâmetros de tensão (σ) e deformação (ε), em que a tensão é obtida a partir da seguinte Eq. 1.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Onde, F é a carga aplicada e A_0 caracteriza a área inicial sem nenhuma influência da carga injetada, sem sofrer qualquer tipo de deformação. E a deformação é caracterizada pela Eq. 2.

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Sendo l_0 o comprimento original da amostra antes de qualquer deformação e l_i o comprimento instantâneo, essa diferença entre as duas grandezas $l_i - l_0$, pode ser representado pela variação do alongamento do corpo de prova Δl .

2.4.4. Deformação Plástica

Para o devido trabalho é de grande importância conhecer a deformação plástica dos metais, mais precisamente do material a ser trabalhado no método de estampagem incremental. A deformação plástica acontece quando as tensões impostas no material o fazem deformar além do limite elástico na curva $\sigma \times \varepsilon$, esse regime se denomina deformação plástica, segundo Callister (1999), a medida que o material deforma além do ponto de transição, a lei de Hooke deixa de ser válida, onde ocorre uma deformação permanente, ou seja, o material não voltará ao seu estado inicial.

O limite de resistência a tração é o ponto máximo que a tensão alcança em um material ensaiado, representado na Fig. 2.6 pelo ponto M, com a adição de mais carga ao ensaio o material dá início a um empescoamento do corpo de prova onde a fratura acontecerá nesse local devido a concentração de tensão.

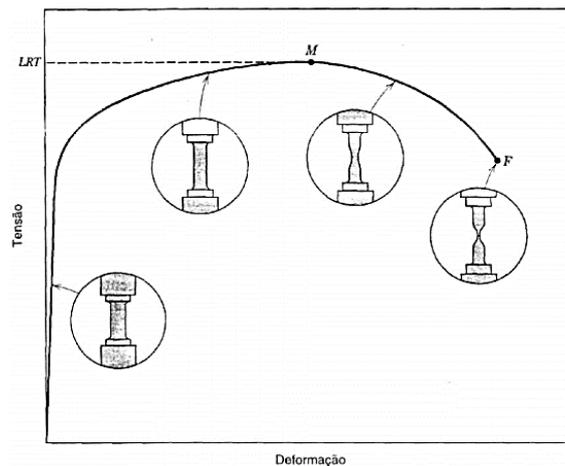


Figura 2.6 – Representação de uma curva tensão x deformação, exemplificando o estreitamento do corpo de prova a partir do limite de resistência a tração M, ate a sua ruptura F. (Callister, 1999).

As variações dos limites de resistência a tração são amplas, segundo Callister (1999), para alumínios esse valor se encontra entre 50 MPa e para os aços de elevada resistência está em torno de 3000 MPa.

2.5. Coeficiente de Anisotropia

Segundo Callister (1999), as propriedades físicas dos monocristais dependem implicitamente da direção cristalográfica adotada nessas medições. O módulo de elasticidade por exemplo pode ter valor diferente dependendo da direção que esse valor é obtido, essa variação em função da direcionalidade é conhecida por anisotropia, e está diretamente relacionada com a variação do espaçamento atômico em função da direção cristalográfica.

Na conformação de chapas não é diferente, devido ao processo de laminação os grãos cristalinos são alongados na direção de maior deformação de tração, durante o processo os grãos são achatados e reorientados em uma direção preferencial ao processo de fabricação, acarretando em um material que anteriormente seus planos atômicos e direções cristalinas tinham uma certa aleatoriedade (material isotrópico), agora devido ao processo esse grãos migram a uma direção preferencial tornando uma chapa anisotrópica e que apresenta diferentes propriedades de acordo com a direção adotada.

Um modo de avaliar o grau de anisotropia das chapas quando deformadas plasticamente é através do índice de anisotropia. O índice de anisotropia ou coeficiente de Lankford (r) é a

razão da deformação real de sua espessura e largura do corpo de prova tracionado, onde calcula-se segundo Schaeffer (1999), pela Eq. 3.

Segundo Schaeffer (1999), a razão de deformação é definida por:

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{b_0 \cdot l_0}{b \cdot l}} \quad (3)$$

Onde:

b_0 [mm] é a largura inicial do corpo de prova;

b [mm] é a largura instantânea do corpo de prova;

l_0 [mm] é o comprimento inicial do corpo de prova;

l [mm] é o comprimento instantâneo do corpo de prova.

Usualmente obtém-se amostras nas direções de 0° , 45° e 90° orientadas segundo a direção de laminação, consequentemente obtendo r_{0° , r_{45° e r_{90° . Considerando que as direções de laminação são arbitrárias, a partir das três razões é possível calcular a anisotropia média (rm) Eq. (4) e a anisotropia planar (Δr) Eq. (5) (SCHAEFFER, 1999).

$$rm = \frac{1}{4} \cdot (r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (4)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (5)$$

Por definição um material isotrópico deve possuir um $rm = 1$ e $\Delta r = 0$. Um material considerável bom para estampagem profunda de chapas deve possuir um elevado valor de anisotropia média.

2.6. Aço Inoxidável Austenítico 304

Os aços inoxidáveis mais comuns da série austenítico (AISI) são ligas de Fe+Cr+Ni : 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 316L, 317, 321, 347 (SILVA; MEI, 1988).

Aços Inoxidáveis austeníticos podem ser classificados em estáveis e metaestáveis. Os austeníticos estáveis como AISI 304 retém a estrutura austenítica mesmo após a considerável

deformação a frio, sendo ideal para o processo de estampagem incremental que busca a máxima capacidade da deformação plástica do material para obtenção da fabricação da peça desejada.

2.6.1. Composição Química

São compostos basicamente por Fe-Cr-Ni onde se compõe de 0,08% de C uma faixa de 18,0% a 20,0% de Cr combinados com outros elementos de liga que ajuda nas propriedades mecânicas deste material, sendo 8,0% a 10,5% de Ni, 2,0% de Mn e 0,045% de P. Não são ferro magnéticos e não endurecem por tempera, e apresentam uma estrutura austenítica CFC a temperatura ambiente.

Quando encruados o aço inox austenítico apresenta um aumento na dureza e estão mais propensos a corrosões intergranulares. Entre os aços inoxidáveis conformados, é a classe que apresenta maior resistência à corrosão e, conseqüentemente, são os mais utilizados em componentes industriais sujeitos à corrosão. Segundo Silva (1988), os aços inoxidáveis austeníticos metaestáveis quando sujeitos a deformação a frio transformam sua microestrutura para martensítica ou acicular, onde a curva tensão x deformação está representada na Fig. 2.7. Na Tabela 2.1 pode-se verificar algumas das propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis austeníticos.

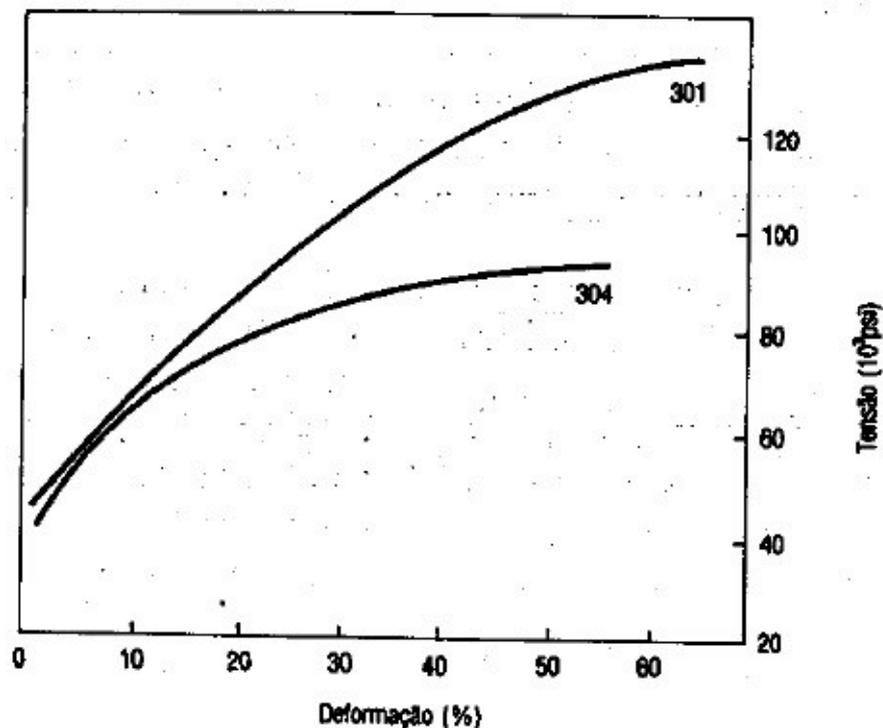


Figura 2.7 - Curva tensão deformação dos aços inoxidáveis austeníticos evidenciando os aços AISI 301 e 304 – (Silva, 1988)

Tabela 2.1 – Propriedades Típicas dos aços inoxidáveis austeníticos recozidos ou solubilizados. (SILVA, 1988)

AISI	Limite de escoamento 0,2% (Mpa)	Limite de resistência (Mpa)	Along. Em 50mm (%)	R.A. (%)
201	390	810	55	(Chapas finas)
202	390	740	55	-
301	280	770	55	70
304	300	590	60	70
310	320	670	50	65

2.7. Metalografia

Segundo Colpaert (1974) a metalografia consiste em analisar os produtos metalúrgicos, através de microscópios para analisar tanto a sua constituição e textura dos materiais em análise. Este estudo requer um pré-tratamento das amostras antes da análise, sendo necessário recorrer ao lixamento e polimento das amostras e posteriormente atacadas por um reativo adequado, com finalidade de expor seus grãos.

A importância de efetuar esse estudo, é que as propriedades mecânicas dos materiais não dependem explicitamente da composição química, mas também de sua textura, podendo então um mesmo aço apresentar um aspecto mole, duro, duríssimo, quebradiço, elástico, tenaz, etc., onde essa textura pode ser obtida por diversas formas seja tratamentos térmicos ou trabalhos mecânicos que esse aço fora submetido (COLPAERT, 1974).

2.7.1. Técnica metalográfica

É possível dividir um ensaio metalográfico em diversas fases:

- a) Escolha da seção a ser analisada;
- b) Tratamento da superfície em análise;
- c) Exame ao microscópio para observação das ocorrências visíveis sem ataque;

- d) Ataque da superfície polida por algum reagente químico adequado;
- e) Exame ao microscópio para observação da textura;
- f) Aquisição dos documentos que reproduzam o aspecto previamente observado no microscópio (fotografia).

2.8. Rugosidade

Sendo a estampagem como um processo de fabricação, segundo König (1981), a produção de uma superfície totalmente lisa a partir deste processo não é possível. Quando observada uma determinada superfície utilizando um microscópio, pode-se verificar regiões onde apresentam picos e vales o que define a rugosidade superficial da mesma.

Existem diversos parâmetros que permitem representar a qualidade superficial de uma determinada superfície, o que permite analisar a rugosidade das peças, onde é possível destacar R_a , R_z e R_q como parâmetros mais utilizados para quantificar e representar a integridade superficial.

2.8.1. Parâmetro (R_a)

Define-se como sendo o parâmetro R_a , a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil em relação à linha média em um determinado comprimento de amostragem. A Fig. 2.8 mostra o parâmetro de rugosidade R_a . Matematicamente R_a é definido pela Eq. 6.

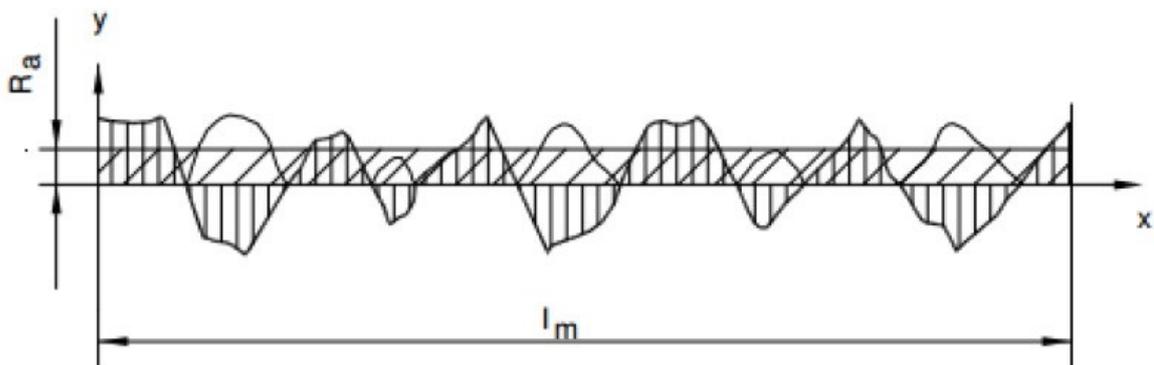


Figura 2.8 - Representação do parâmetro R_a Fonte: Bet, 1999.

$$R_a = \frac{\int_0^{l_m} |y(x)| dx}{l_m} \quad (6)$$

2.8.2. Parâmetro (R_z):

O parâmetro da rugosidade R_z é definida como a média aritmética dos 5 valores de rugosidade parcial, entende-se como parcial a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos mais extremos, acima e abaixo da linha mediana, existentes dentro de dado comprimento de amostragem (cutoff). Matematicamente, pode ser descrita pela Eq. 7 König (1981):

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 z_i \quad (7)$$

Observa-se pela Fig. 2.9, o parâmetro R_z , caracterizado pelo afastamento de duas linhas paralelas à linha média, medidas em um cutoff, tangenciando o perfil de rugosidade nos pontos extremos superiores e inferiores.

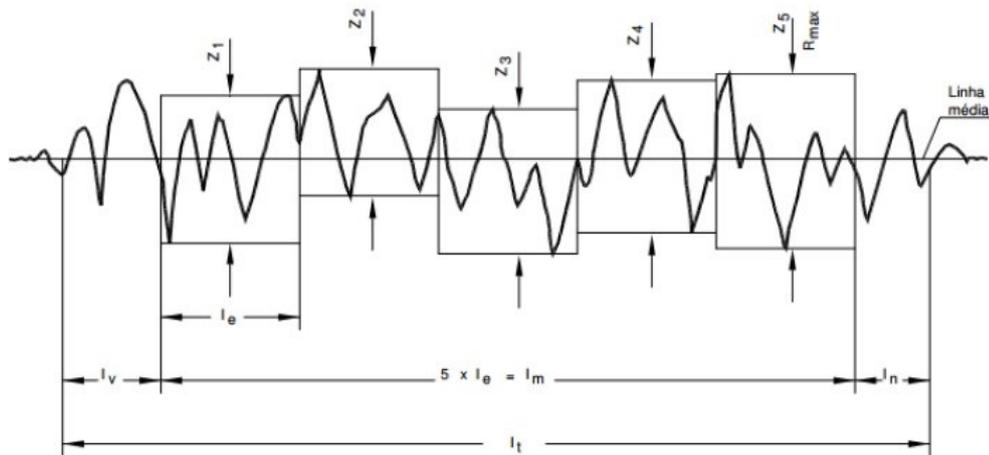


Figura 2.9 – Representação do parâmetro R_z , Fonte: KÖNIG, 1981.

2.8.3. Parâmetro (R_q):

O parâmetro R_q é definido como sendo a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados das ordenadas dentro um dado comprimento de amostragem em relação a linha média do percurso de medição (lm). Matematicamente, pode ser descrita pela Eq. 8.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \quad (8)$$

2.9. Estampagem Incremental

O surgimento de processos como fábrica aditiva, frequentemente conhecida como prototipagem rápida, é um processo não muito econômico devido ao elevado investimento inicial de matéria-prima necessários. Além disso, a fabricação utilizando chapas finas são difíceis ou impossíveis, devida a deficiência na manipulação de metais no processo, originando a estampagem incremental de chapas (*Incremental Sheet Forming – ISF*), desenvolvido e patentado por Leszak (1967). Processo de conformação que consiste em obter diversas geometrias sem o uso de matrizes (LOPES, 2013), conforme Fig. 2.10.

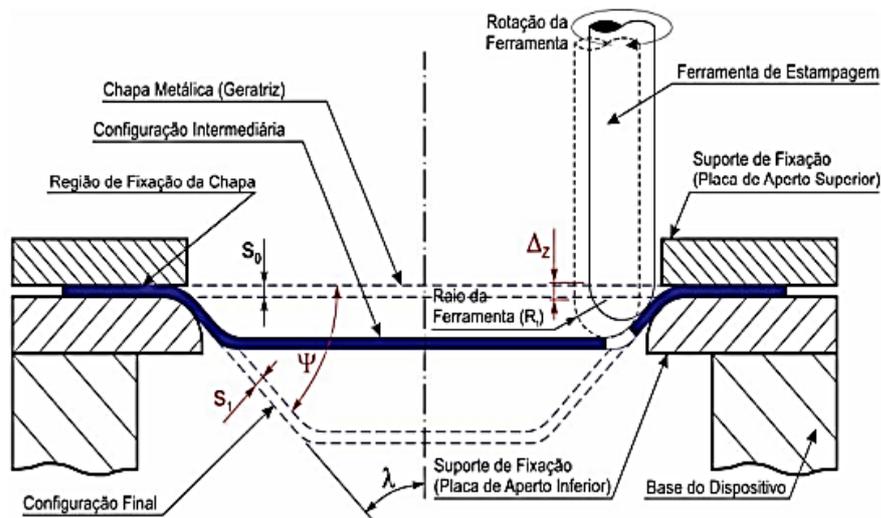


Figura 2.10 – Processo esquemático de estampagem incremental. Sendo Δ_z = Profundidade do passe vertical, Ψ = Ângulo de inclinação da parede da chapa, S_0 =Espessura inicial da chapa, S_1 = Espessura final da chapa e λ = ângulo do semi-cone (Daleffe, 2014)

Em comparação com processos tradicionais de estampagem que utilizam ferramentas complexas para obtenção dos resultados, o processo de estampagem incremental visa a utilização de uma fresadora ou uma máquina que dispõe do Controle Numérico Computadorizado (CNC), utilizando uma ferramenta com ponta semiesférica montada no eixo vertical da máquina CNC para a conformação da chapa.

A exemplificação do processo em execução consta na Fig. 2.11, no qual é verificado a ferramenta em contato com a chapa aplicando a tensão necessária para deformar e confeccionar a peça final, sendo claramente observado a complexidade da superfície confeccionada.



Figura 2.11 – Representação da execução do processo de estampagem incremental. (B. Lu, 2014)

Existe um vasto mercado no qual abrange essa técnica de estampagem, geralmente em pequenos lotes de peças, como aplicações em componentes cirúrgicos, próteses crânio-maxilofaciais, no setor automobilístico, peças para automóveis antigos e motocicletas. Pode-se citar também aplicações em indústrias de cutelaria (facas, talheres e utilidades em geral), peças para substituição de componentes que não se encontra mais disponível no mercado e protótipos.

Segundo Jeswiet (2008), existem vantagens relacionados a estampagem incremental, conforme os seguintes itens:

- Pode - se obter qualquer geometria através dos dados de um software CAD, aplicado em prototipagem rápida ou até mesmo em pequenos volumes de produção;
- O processo de estampagem incremental dispensa a utilização de matrizes, embora necessite da confecção de um suporte de apoio para chapas;
- A variabilidade no *design* e tamanho de formas podem ser obtidos variando o grau de flexibilidade;
- Um centro de usinagem CNC convencional pode ser utilizado para execução do processo de estampagem;
- O limitante do tamanho das peças obtidas é limitado pelo tamanho da máquina utilizada;

- A qualidade superficial da peça acabada é facilmente controlada com a variação dos parâmetros de trabalho como o incremento vertical, velocidade de avanço ou até mesmo a rotação da ferramenta, dentre outros.

Desvantagens do processo de estampagem incremental, segundo Jeswiet, et al. (2005), Cavaler (2010):

- O processo é relativamente lento em comparação com outros processos de conformação convencional;
- O processo é limitado a produção de pequenos lotes de peças;
- Formação de ângulos de 90° não é alcançado;
- É presente no processo a recuperação elástica do material, sendo necessário uma intervenção por meio de algoritmos para corrigir essa desvantagem;
- Máquinas fresadoras não são projetadas para receber carregamentos no spindle, podendo então danificar o equipamento durante os processos de estampagem incremental.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1. Estampagem Incremental

O material de trabalho utilizado foi uma chapa de aço AISI 304 com espessura de 0,5 mm e dimensões de 1000x500 mm para execução do pré-teste e testes definitivos onde possibilitou-se a retirada das informações em análise. Com o auxílio de uma tesoura elétrica da BOSCH-GSC28, foi fatiado esta chapa em quadrados de 240x240 mm, conforme ilustrado pela Fig. 3.1, com o intuito de produzir os corpos de prova para os testes de estampagem, análise metalográfica e testes de tração, conforme representado pela Fig. 3.1.

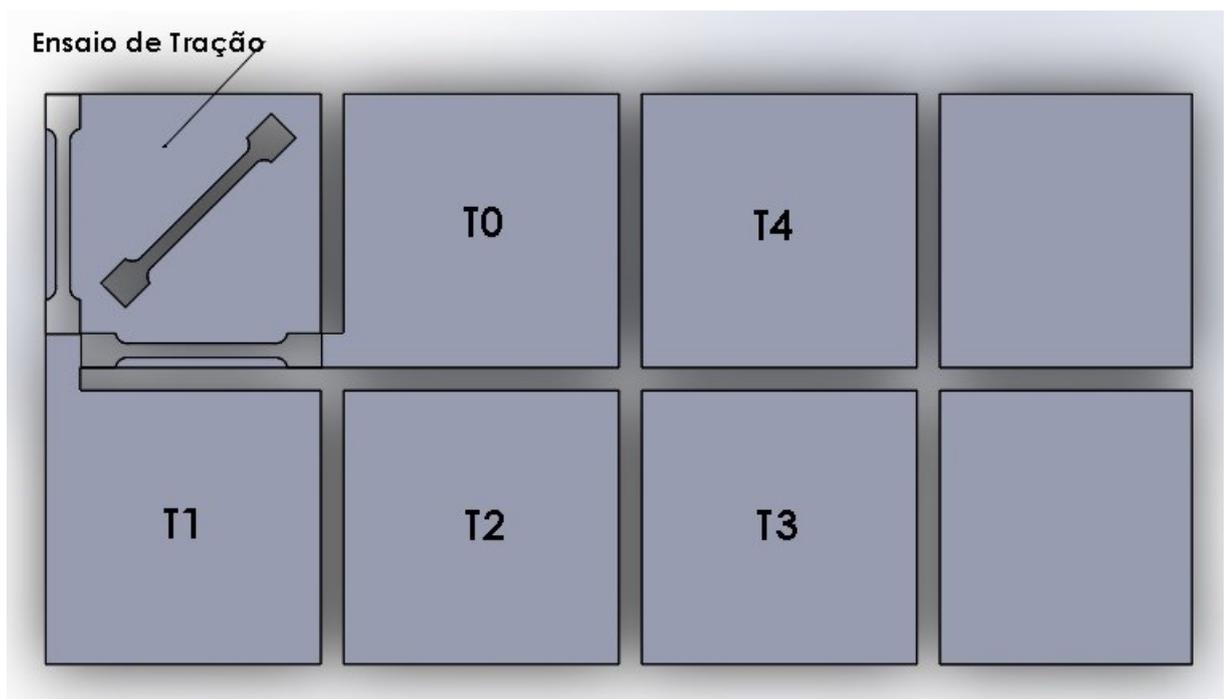


Figura 3.1 - Esquema chapa utilizada, sendo T0 destinada ao pré-teste, T1- teste 1, T2- teste 2, T3- teste 3 e T4- teste 4.

3.2. Ensaio de tração

Para a realização do ensaio de tração, primeiramente foram retirados na chapa de aço inoxidável AISI 304 os corpos de prova para os testes conforme representado pela Fig. 3.2,

através do processo de corte à jato d'água abrasivo. Foram cortados três corpos de provas em três direções (0, 45° e 90°) relativas a direção de laminação da chapa. As dimensões padronizadas segundo a norma ABNT NBR ISO 6892-1 dos corpos de prova são mostrados na Fig. 3.3 e ilustrados antes e após a fratura pela Fig. 3.4.

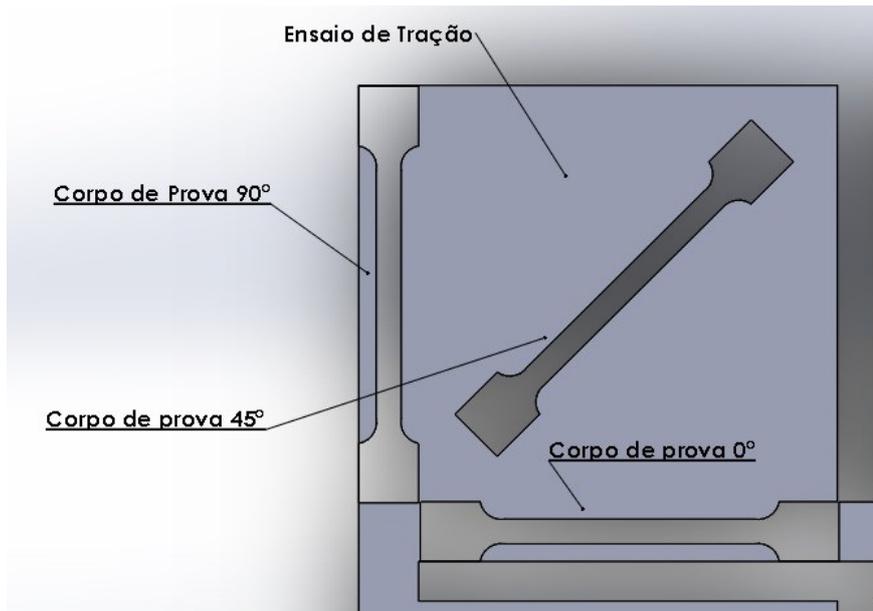


Figura 3.2 – Detalhe das amostras retiradas de uma chapa com dimensões 240 x 240 mm destinadas para os ensaios de tração.

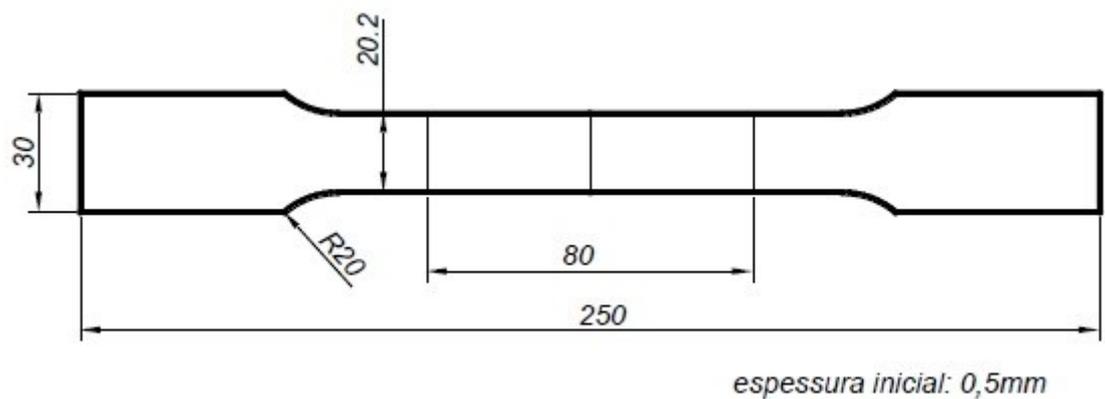


Figura 3.3 – Dimensões padronizadas destinadas ao corpo de prova para os testes de tração.



Figura 3.4 – Fratura do corpo de prova após o teste de tração.

3.3. Parâmetros de testes

Foi obtido 4 chapas para os ensaios, sendo que uma foi destinada a um pré-teste para definição dos parâmetros de trabalho, como mostra a Tab. 3.1, notado em todas as variáveis envolvidas no processo.

Para critérios de lubrificação e refrigeração do sistema foi adicionado ao processo 40 ml de fluido lubrificante SAE 40, variou-se o avanço da ferramenta mantendo sempre a rotação em 1000 rpm no programa CNC e o potenciômetro da máquina em 120%, totalizando uma rotação final constante para todos os testes de 1200 rpm, geometria da ferramenta foi a mesma em todos os testes, a geometria da cavidade foi variada apenas no pré-teste passando a ser constante nos testes definitivos como exemplificado na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de testes.

	Teste 0	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Geometria	Pirâmide	Cone	Cone	Cone	Cone
(v_f) [mm/min]	250	250	300	500	1000
n [rpm]	500	1000	1000	1000	1000
Ferramenta [mm]	10,28	5,65	5,65	5,65	5,65
Óleo Lubrificante	SAE 40				

3.4. Procedimento experimental

Para a devida conformação das chapas foi utilizado o centro de usinagem CNC *Romi Bridgeport Discovery 760*, em que os parâmetros técnicos do equipamento estão presentes no Anexo I. O centro de usinagem foi disponibilizado pelo Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e adaptado ao processo de estampagem incremental onde a comunicação operador /máquina realizada através do comando numérico computadorizado (CNC), como o centro de usinagem utiliza em suas configurações o comando *SINUMERIK 810D* houve a necessidade de encontrar um programa acessível e ao mesmo tempo contemplando os comandos requeridos, sendo assim o programa FUSION 360® da *AUTODESK* (utilizando a versão original disponível pelo fabricante e licença gratuita para estudantes) atendeu perfeitamente, onde a geometria final das peças foi gerada no programa e a partir desta, foi simulado a trajetória da ferramenta. O software interpreta essa trajetória e gera o programa CNC (Apêndice II), proporcionando meios de comandos gerados através de coordenadas cartesianas (X, Y e Z) e a máquina produzir a peça projetada no software. O código é transmitido a máquina via pacotes de dados por cabo VGA, pela Fig. 3.5 pode-se verificar a ligação e os equipamentos disposto pelo Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU). Foram geradas as trajetórias para um tronco de pirâmide e quatro troncos de cone, com passo vertical ΔZ (incremento vertical) de 0,5 mm.



Figura 3.5 – Esquema de ligação dos testes de estampagem incremental, sendo 1 – centro de usinagem CNC, 2 – Cabo de ligação VGA, 3 – Monitor de comandos e transmissão dos pacotes de dados.

3.4.1 Suporte de fixação

O suporte de fixação tem como intuito de dar sustentação a chapa no processo de estampagem incremental, portanto é de suma importância ter um componente rígido e que resista aos esforços solicitados no processo com a maior eficiência de atender ao propósito sem atribuir erros ao processo. As chapas foram cortadas com as devidas dimensões de 240x240 mm, o polímero de proteção foi retirado da chapa inox e depois fixada no suporte. As Fig. 3.6 e Fig. 3.7, representam o suporte confeccionado pelo LEPU para os testes.

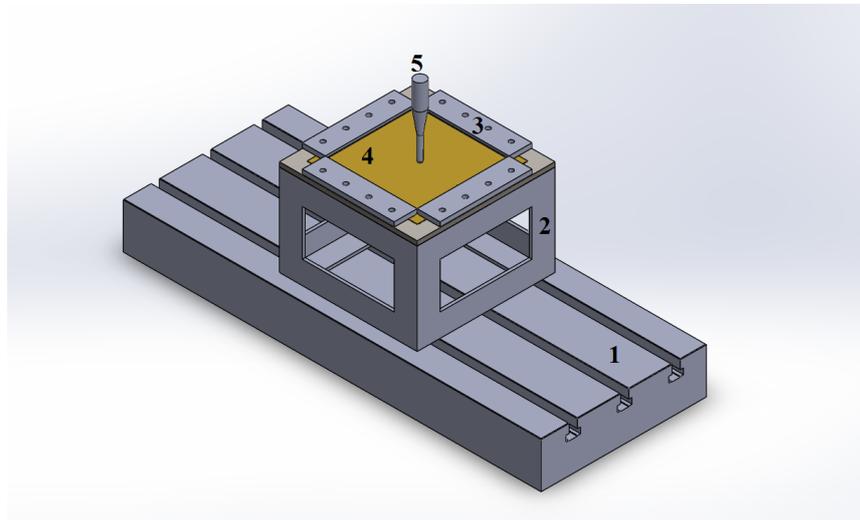


Figura 3.6 – Suporte de fixação da chapa (peça), sendo: 1 – Mesa da máquina CNC (Discovery 760); 2 – Colunas de sustentação dos esforços; 3 – Furos de fixação da chapa; 4 – Chapa (peça); 5 – Ferramenta de conformação. Gerada através do Software Solidworks.



Figura 3.7 – Ilustração do suporte de fixação das chapas AISI 304.

3.4.2. Ferramenta de estampagem

Após a fixação da chapa a ferramenta de estampagem foi fixada no eixo árvore da máquina CNC, a ferramenta conforme ilustrada na Fig. 3.8 com as duas partes preparadas a chapa foi devidamente lubrificada com uma fina camada de óleo SAE 40.

Para a estampagem da chapa e obtenção das cavidades foi desenvolvida uma ferramenta de conformação utilizando como material o aço 52100 de geometria semiesférica com diâmetro $d=5,65$ mm e comprimento de $L=98,48$ mm.



Figura 3.8 – Ferramenta utilizada nos testes de estampagem incremental.

3.5. Projeto da geometria de teste

Para o seguinte estudo, após os resultados do pré-teste definiu-se para todos os testes em análise corpo de cone visando obter as seguintes dimensões conforme o projeto da Fig. 3.9 e exemplificado em 3D pela Fig. 3.10.

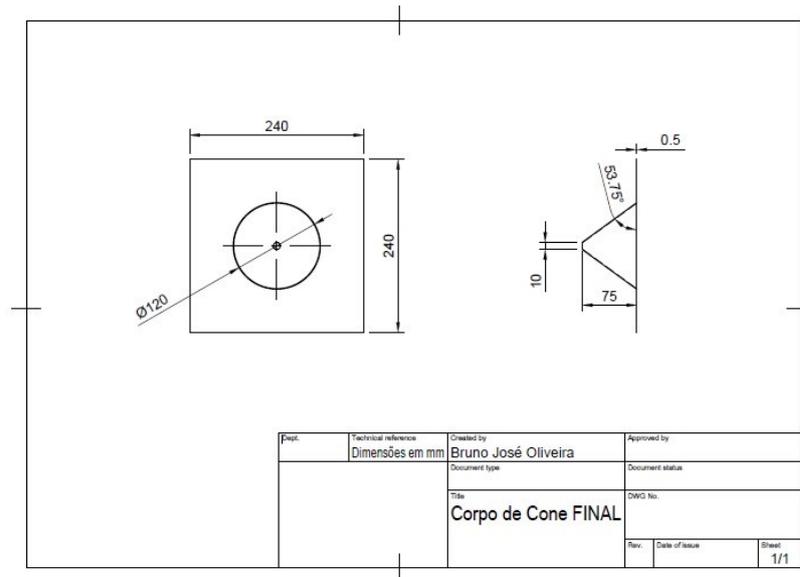


Figura 3.9 – Projeto da geometria corpo de cone

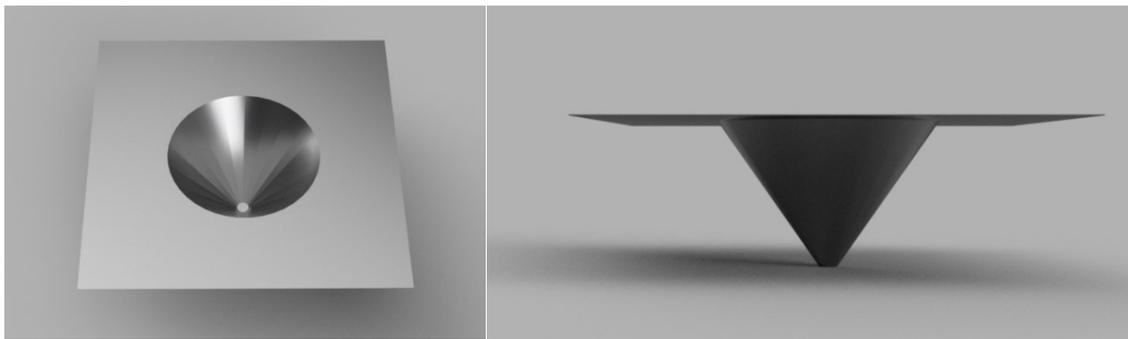


Figura 3.10 - Representação tridimensional da geometria em análise.
Gerada através do Software Fusion 360®

Com a definição de todos os parâmetros e esquemas de ligação definidos, iniciou-se os testes representado pela Fig. 3.11, o programa fornecido pelo *software* Fusion 360 ® contemplado em anexo do presente trabalho, onde vale ressaltar a extensão de linhas por conta da quantidade de pontos se encontra no Apêndice II apenas o código utilizando para gerar a

cavidade com o avanço de $v_f = 1000 [mm/min]$ comando representado no programa CNC por N27 ... F1000, pois para os códigos utilizados para gerar as outras cavidades foi substituído apenas o comando referente ao avanço de 250, 300 e 500 $[mm/min]$ representados pelos comandos F250, F300 e F500, respectivamente.

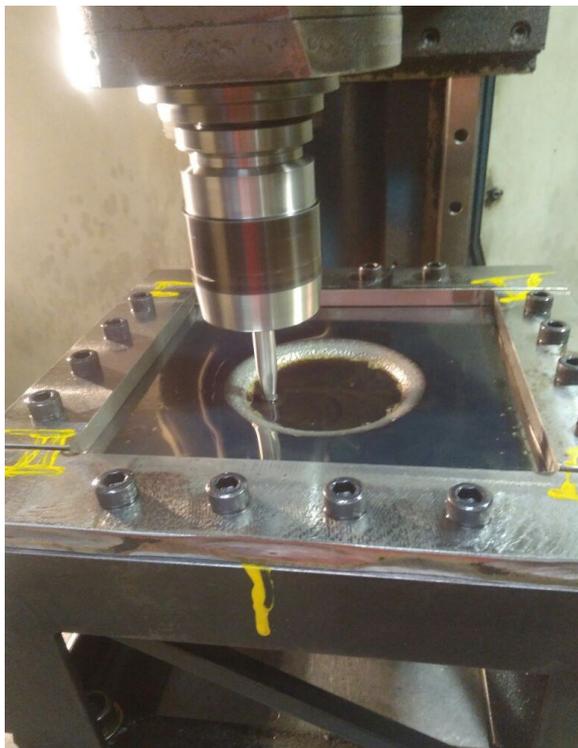


Figura 3.11 - Foto do ensaio de estampagem de chapa de aço inoxidável AISI 304.

3.6. Obtenção dos dados para análise de rugosidade e metalografia

Posteriormente a conclusão dos ensaios de estampagem incremental, foi retirado dos cones amostras medindo 14x14 mm utilizando a tesoura elétrica BOSCH-GSC28, para análise metalográfica e rugosidade. Para a metalografia, essas amostras foram embutidas na posição vertical em baquelite comercial, utilizando a máquina Fortel EFD 30, destinada para embutimento a quente. As amostras embutidas estão representadas pela Fig. 3.12.



Figura 3.12 – Amostras após o embutimento e destinadas à análise metalográfica.

Para caracterização da superfície em análise, foi submetido as amostras embutidas em processos graduais de lixamento utilizando lixas d'água de granulações 100, 200, 400, 1000 e 1200. Após o processo de lixamento, as amostras foram polidas utilizando óxido de cromo ($5\mu\text{m}$) e atacadas quimicamente utilizando água régia composta na proporção de uma parte de ácido nítrico (HNO_3) para três partes de ácido clorídrico (HCl).

Para análise de rugosidade com o intuito de quantificar e mensurar a influência do avanço da ferramenta sobre a qualidade da superfície apresentada no final do processo de estampagem, foi utilizado um rugosímetro eletrônico portátil TAYLOR HOBSON S100 calibrado com cut-off de 0,8 mm e comprimento de medição de 4 mm, foram obtidos os parâmetros R_a , R_q e R_z de todas as superfícies estampadas. Foi realizado cinco medições para cada ensaio e feita a média e o desvio padrão desses valores. As amostras foram obtidas conforme a Fig. 3.13 (a) pelas dimensões representada pela Fig. 3.13 (b).

Vale ressaltar que para todas análises tanto metalográfica embutidas vertical e horizontalmente, quanto de rugosidade foram obtidas amostras da chapa AISI 304 anteriormente aos testes (tensões residuais oriundas apenas da laminação) para critério de comparação e verificação das mudanças realizadas na chapa através do processo de estampagem incremental.

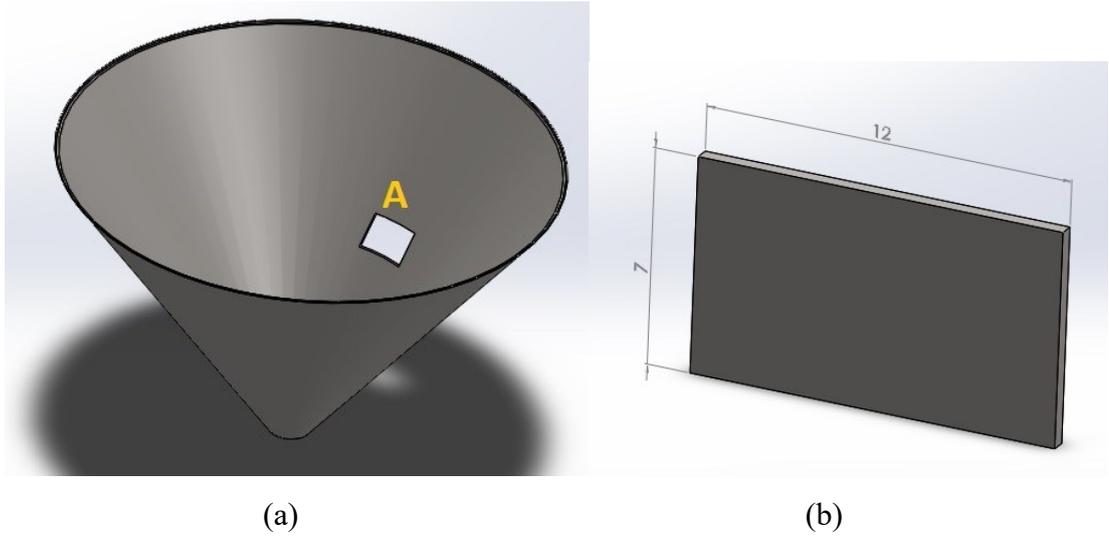


Figura 3.13 – Representação do local de obtenção das amostras após os testes (a); (b) dimensões dos corpos de prova.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta todos os resultados obtidos nos ensaios de estampagem, assim como análise e discussões.

4.1. Teste de tração

O teste de tração é de suma importância para obter informações do material de trabalho no processo de estampagem incremental. Esse levantamento é feito por ensaio de tração, sendo um dos ensaios mecânicos mais comuns utilizado em pesquisas, devido a sua facilidade e simplicidade de execução. Procurando evidenciar as propriedades do aço AISI 304, foi levantado a curva tensão σ x deformação ϵ . A Fig. 4.1, representa o gráfico σ x ϵ obtido na direção 0° referenciado pelo sentido da laminação da chapa o mesmo critério foi utilizado para levantar a curva σ x ϵ nos sentidos de 45° e 90° onde os resultados estão demonstrados através da Tabela 4.1.

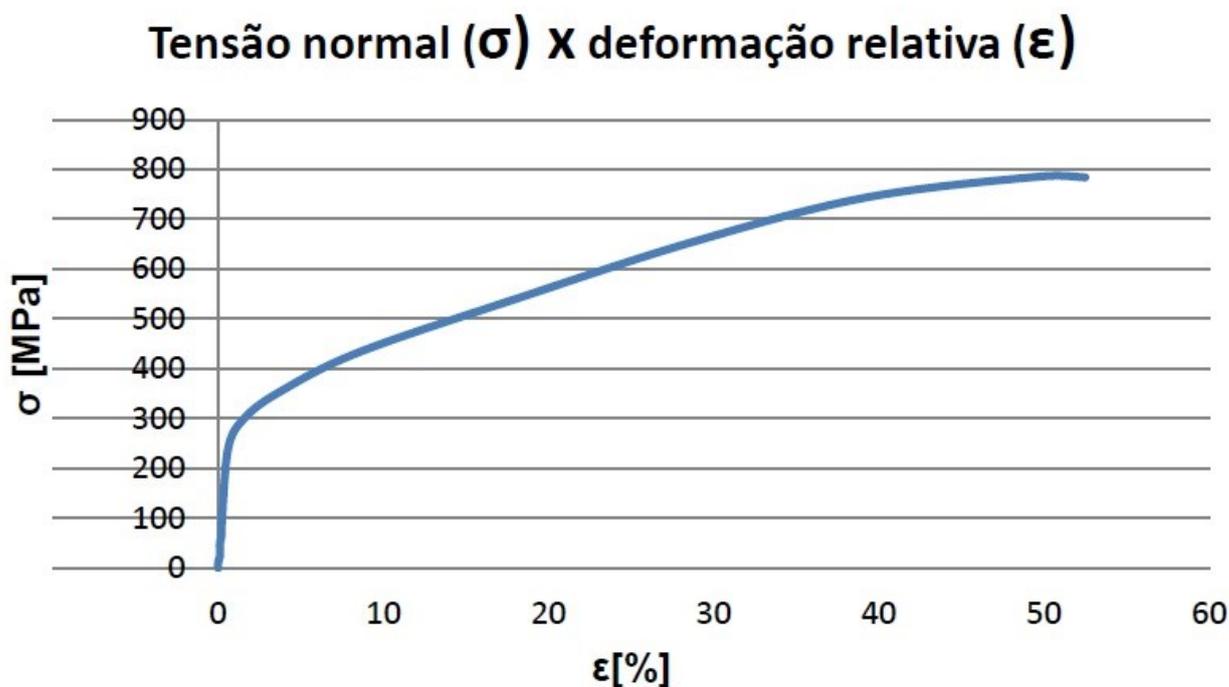


Figura 4.1 - Gráfico de tensão normal (σ) por deformação relativa (ϵ) na direção 0° .

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304 obtidas pelo ensaio de tração realizado em três direções.

Direção	σ_e[Mpa]	R_m[Mpa]	ϵ[%]
0°	264	792	52
45°	223	733	56
90°	251	731	54

Averiguando as propriedades mecânicas encontradas através do teste de tração, foi feita uma consulta ao catálogo do fabricante Aperam®, um setor responsável pela fabricação de aços inoxidáveis da empresa ArcelorMittal®. Consultando as propriedades técnicas do aço AISI 304 é possível observar um limite de resistência R_m de 720 MPa, o limite de escoamento é de 320 Mpa e por fim o alongamento é de 57%. Os resultados obtidos estão próximos aos valores fornecidos pelo fabricante, onde essa divergência encontrada pode ser explicada pelo controle da temperatura durante os ensaios e/ou meio de fabricação e obtenção dos corpos de prova.

4.2. Análise geométrica

Como o processo de estampagem incremental consiste em uma ferramenta de conformação de formato semiesférico, pressionando o material para ser obtido a deformação da peça. Consequentemente esse contato entre as partes gera atrito, o que gera calor, fator fundamental nesta primeira análise.

4.2.1. Teste 0 (Pré-teste)

Com parâmetros iniciais, foi adotado uma geometria de pré-teste de um tronco de pirâmide. Foram utilizados os parâmetros de trabalho avanço, rotação da ferramenta e diâmetro como ponto inicial de pesquisa juntamente com o fluido lubrificante especificados na Tab. 3.1. Estes parâmetros funcionaram como base inicial para os futuros testes definitivos. Após o teste, obteve-se a geometria apresentada, conforme ilustrado na Fig. 4.2.

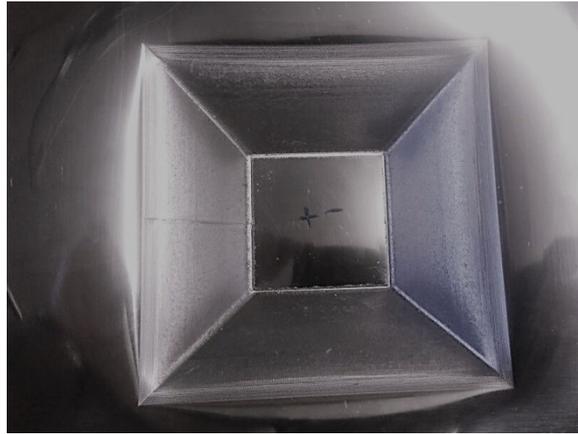


Figura 4.2 – Peça produzida após o pré-teste (Corpo de Pirâmide).

4.2.2. Teste 1

Com o intuito de obter o mesmo sucesso do pré-teste, manteve-se o avanço em 250 mm/min, dobrando a rotação e diminuindo o diâmetro da ferramenta aproximadamente pela metade com o intuito de compensar o aumento da rotação e mantendo o fluido lubrificante. Devido ao rompimento da superfície da chapa o teste 1 foi interrompido com 25 minutos após o seu início, gerando uma cavidade com profundidade de 11,16 mm conforme ilustra a Fig. 4.3.



Figura 4.3 – Geometria estampada após teste 1.

4.2.3. Teste 2

Para o teste 3 foi adicionado 20% no valor inicial do parâmetro de referência totalizando 300 mm/min, e mantendo os demais parâmetros constantes, conforme o teste 1. A chapa referente ao teste 2 também rompeu, ocasionando a parada imediata do experimento. O teste foi interrompido com 39 minutos após o seu início, gerando uma cavidade com profundidade de 15,15 mm conforme ilustra a Fig. 4.4. Pela Fig. 4.5 foi observado a trinca e a ampliação da mesma Fig. 4.6, ocasionada durante o processo de estampagem incremental.

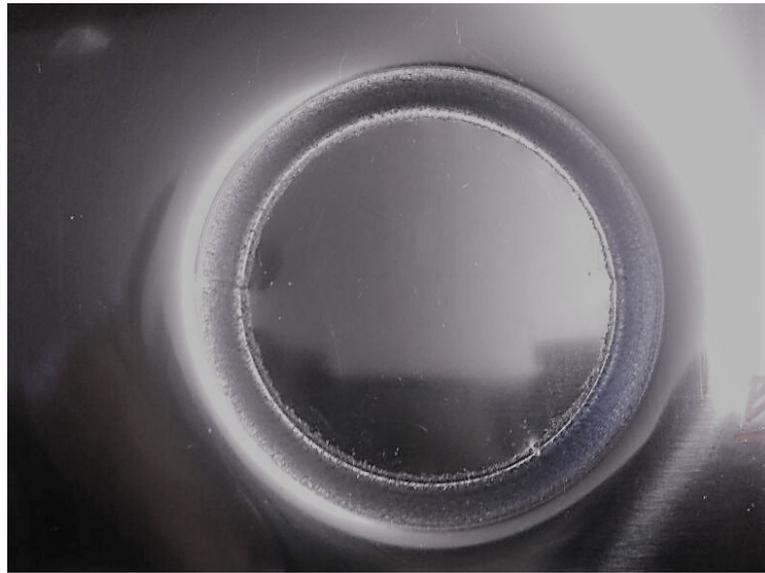


Figura 4.4 – Geometria estampada após teste 2.

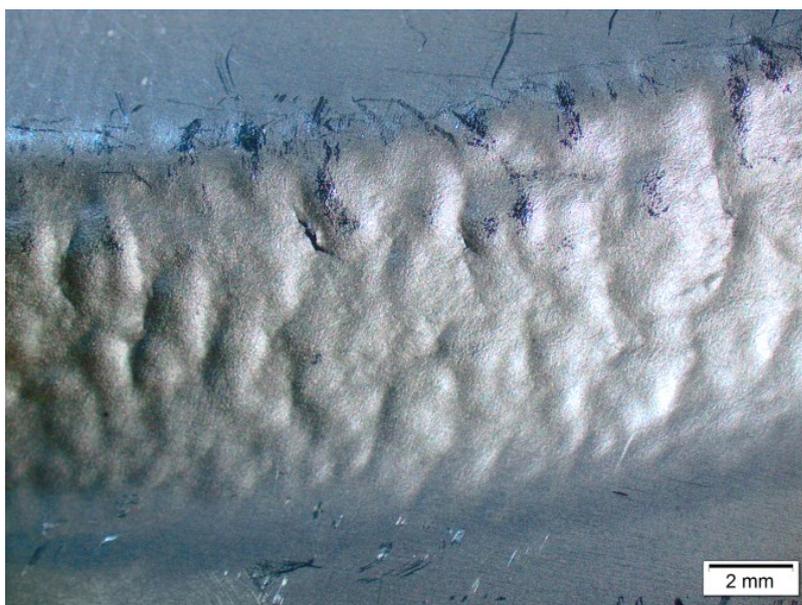


Figura 4.5 – Representação da trinca propagada na superfície do teste 2.



Figura 4.6 – Representação da ampliação da trinca propagada na superfície do teste 2.

4.2.4. Teste 3

No teste 3, no qual foi utilizado um avanço de 500 mm/min, o ensaio teve sua realização até o final do processo, gerando uma cavidade com profundidade de aproximadamente 72,3 mm, representado pela Fig. 4.7, profundidade bem próxima ao desejado em que no projeto a dimensão seria 75 mm.



Figura 4.7 – Representação da cavidade obtida após o teste 3.

4.2.5. Teste 4

Para o teste 4, assim como o teste 3, foi alcançado a totalidade sem interrupção do processo, para isto foi utilizado para o ensaio um avanço de 1000 mm/min e os demais

parâmetros constantes, o que gerou uma cavidade de 61,5 mm de profundidade, representado pela Fig. 4.8.



Figura 4.8 – Representação da cavidade obtida após o teste 4

Na Tab. 4.2 os resultados das profundidades dos testes, relacionados com o avanço e o tempo de ensaio. Pode-se analisar superficialmente os resultados obtidos após os testes.

Para os testes 2 e 3, devido ao atrito gerado por utilizar uma rotação elevada da ferramenta de 1000 rpm e avanços relativamente baixos, essa combinação de parâmetros geraram um atrito local maior, presumindo variações de temperaturas durante toda a trajetória da ferramenta. Esta oscilação de temperaturas ocasiona-se dilatações e contrações da chapa durante o processo de estampagem, gerando tensões de tração e compressão, fazendo abrir trincas e fissuras durante o processo e ocasionando a interrupção do processo de estampagem incremental.

Tabela 4.2 – Relação do avanço e o tempo de ensaio com a profundidade do cone obtida.

Testes	Tempo de ensaio (%)	Avanço (mm/min)	Profundidade (mm)
1	15%	250	11,16
2	23%	300	15,15
3	100%	500	72,3
4	100%	1000	61,5

Tempo total dos testes, aproximadamente 2 horas e 48 minutos.

Por outro lado, os testes 4 e 5 apresentaram um comportamento satisfatório por obterem por completo a geometria sem o aparecimento de fissuras ou trincas. Este aspecto é responsável pelo inverso ocorrido nos testes 2 e 3, pois nos testes em análise houve a mesma rotação elevada

de 1000 rpm, mas em contrapartida é observado também avanços elevados, o que ocasiona uma maior dissipação do calor gerado devido ao atrito, pois não há mais a concentração pontual do calor minimizando. Estas possíveis variações de temperatura na chapa deve-se a redução das dilatações e das tensões de tração e compressão durante o processo. Houve um melhor resultado geométrico para o teste 4, o qual apresentou uma melhor aproximação da profundidade esperada de 75 mm, o que mostra que existe um avanço ideal combinado para uma elevada rotação, pois para o avanço de 1000 mm/min o calor volta a subir ocasionando um maior retorno do material em comparação ao avanço de 500 mm/min.

4.3. Avaliação da rugosidade superficial

Analisando a Fig. 4.9, foi observado a diferença do desgaste na ferramenta após os testes 3 e 4. Vale ressaltar que ao final de cada teste a ponta da ferramenta foi lixada para evitar um desgaste excessivo na chapa estampada. Notou-se um desgaste progressivo do teste 3 para o teste 4, em que para o mesmo os mecanismos de desgaste foram elevados ao máximo. Consequentemente devido ao desgaste ferramental é esperado um desgaste equivalente na chapa estampada, onde o aspecto será averiguado na medição da rugosidade.

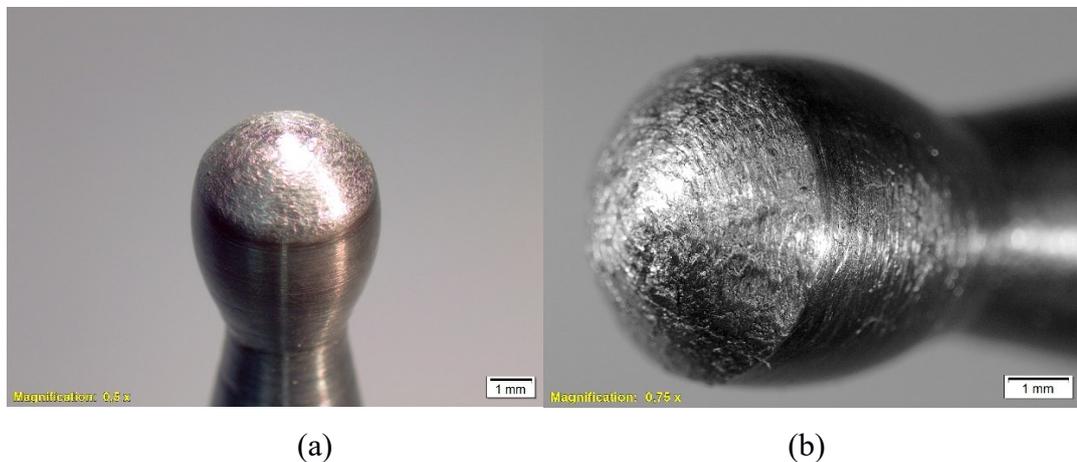


Figura 4.9 - Desgaste da ferramenta associado ao avanço no processo de estampagem incremental. Legenda: (a) ponta da ferramenta após o teste 3; (b) ponta da ferramenta após o teste 4.

É possível avaliar a rugosidade da superfície das chapas conformadas, medidos em valores dos parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_q dos testes em análise (T1, T2, T3 e T4). Além de uma amostra da chapa lisa (sem conformação) para critério de parâmetro inicial, o teste 0 não entra na análise, pois foi utilizado apenas para levantamento de parâmetros de trabalho. Vale ressaltar que todos os dados obtidos das rugosidades através das medições estão presentes no Apêndice III.

É possível observar também pela Fig. 4.10 os valores da rugosidade R_a para os testes em análise, em que é possível averiguar a influência da variação do avanço para o aumento substancial do valor da rugosidade. O valor da rugosidade aumenta possivelmente pelo fato de cada vez que o avanço, o tempo de contato rotacional da ferramenta em um único ponto é diminuído, o que reduz a geração de calor e conseqüentemente a capacidade de conformabilidade da chapa de aço AISI 304.

Com o aumento do avanço v_f , os mecanismos de desgaste são elevados sendo observados e averiguados no desgaste da ferramenta. No teste 4 a rugosidade superficial é maior que no teste 3, o que é perceptível não apenas visualmente na Fig. 4.9, mas que também existe uma relação direta na influência do desgaste da ferramenta, identificado no acabamento superficial da peça estampada. Isso ocorre devido aos mecanismos de desgaste, por não haver um contato suave entre a geometria da ferramenta e a chapa, esse atrito gerado desgasta as duas superfícies, fazendo surgir partículas soltas de material no processo o que potencializa o desgaste superficial devido ao rolamento e o riscamento dessas partículas.

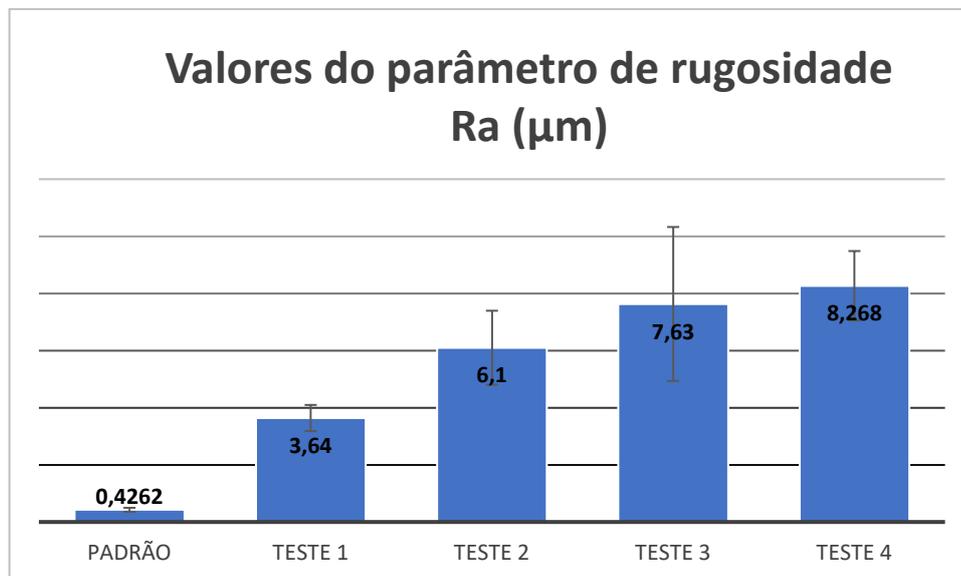


Figura 4.10 – Gráfico representativo dos valores dos parâmetros de rugosidade R_a (μm).

4.4. Análise Metalográfica:

Para critério de parâmetros metalográficos foram adquiridas amostras para análise do material antes do ensaio (padrão) representada pela Fig. 4.11 e depois do processo de estampagem incremental. As amostras para análise metalográfica antes dos testes e depois possibilita a visualização a nível granular afim de estudar a orientação e comportamento dos

grãos antes e o grau de deformação da estrutura inter granular depois da estampagem incremental.

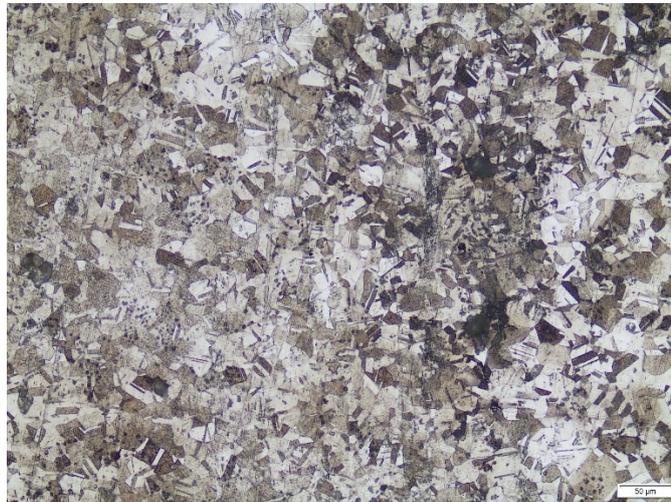


Figura 4.11 – Análise metalográfica chapa de aço AISI 304, não submetida ao processo de estampagem incremental.

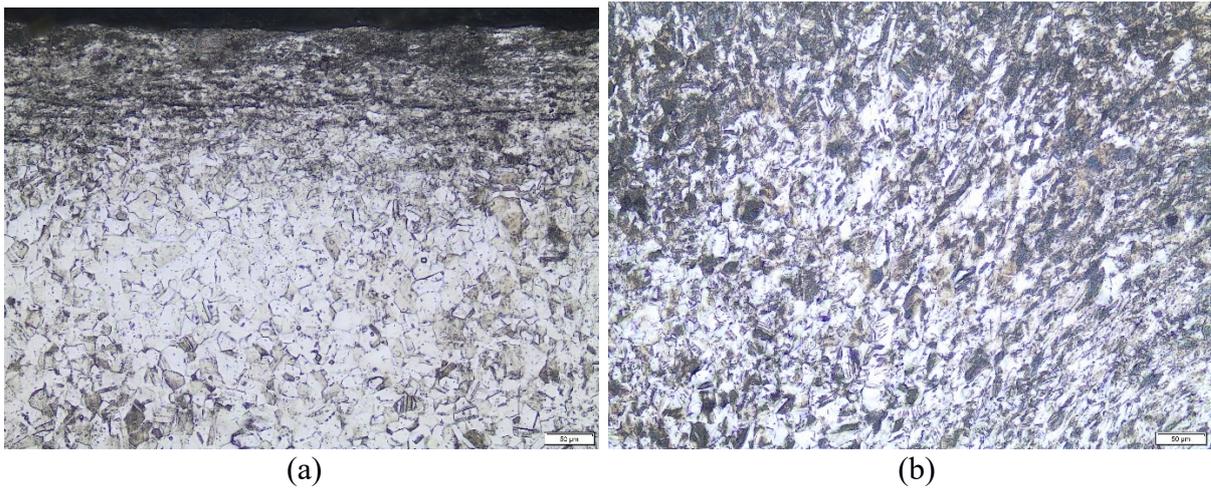


Figura 4.12 – Análise metalográfica após os testes de estampagem incremental; (a) Teste 1; (b) Teste 2.

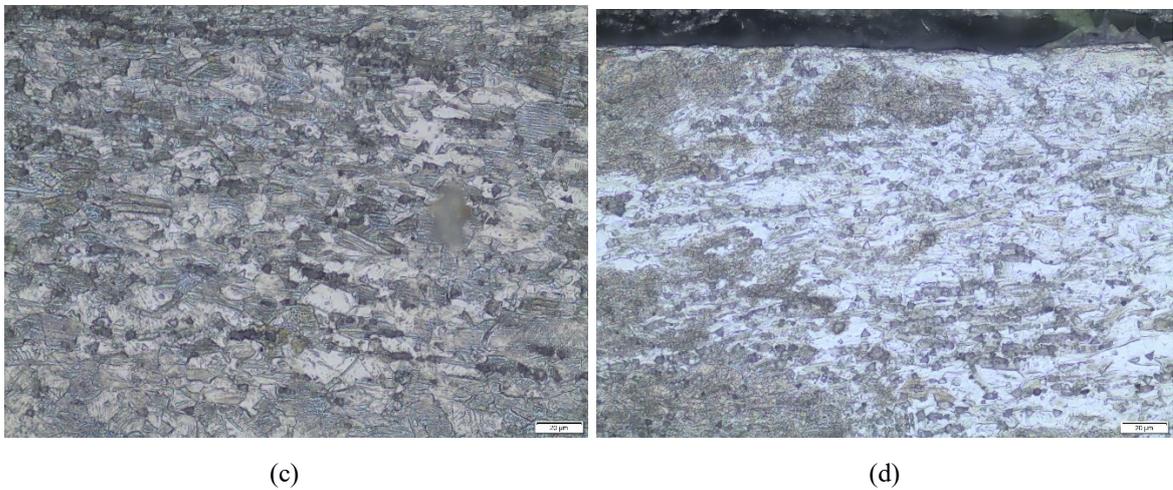


Figura 4.13 – Análise metalográfica após os testes de estampagem incremental; (c) Teste 3 e (d) Teste 4.

Fazendo uma breve comparação entre a metalografia da chapa padrão de aço AISI 304 Fig. 4.11 e com as metalografias das chapas conformadas pelo processo de estampagem incremental, Fig. 4.12 e Fig. 4.13, foi apreendido algumas mudanças significativas no quesito estrutural e visual da microestrutura do material. Percebido claramente pela Fig. 4.12 (a), a zona superior deformada plasticamente, os grãos foram achatados e recristalizados devido à pressão e o calor gerado pelo atrito entre peça e ferramenta.

Nos demais testes conformes Fig. 4.12 (b) e Fig. 4.13 (c) e (d) foi compreendido o aparecimento de uma coloração azulada que é intensificada enquanto ocorre o aumento do avanço, podendo ser resultado da difusão do carbono no material devido ao calor gerado e deformações impostas pela ferramenta contra a chapa. Nota-se que o teste 3 é um meio termo da Fig. 4.12 (b) e Fig. 4.13 (d), o que explica o melhor resultado apresentado da geometria gerada no final do processo.

Portanto, a diminuição do avanço vinculado a uma elevada rotação ocasiona um ganho significativo na temperatura pontual ao longo do processo, aumentando a deformação plástica, gerando defeitos e alterações microestruturais, embora, quando se eleva muito o avanço o atrito aumenta devido as partículas soltas de aço oriundas tanto da chapa quanto da ferramenta de conformação, conseqüentemente o processo terá uma maior geração de calor levando a uma maior recuperação mecânica.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A aplicabilidade do processo de estampagem incremental em chapas finas é relativamente viável, por se tratar de um processo de fácil execução com requerimentos de confecções de equipamentos relativamente simples para seu resultado como, a utilização de uma máquina CNC e um fixador de chapas. Outro ponto de destaque é a não utilização de matriz, o que garante um baixo custo do processo em comparação a outros processos de conformação mecânica em contrapartida pode-se citar o elevado tempo para confecção da peça final.

O aço inoxidável AISI 304 apresentou uma boa conformabilidade no processo, podendo ser facilmente empregado como matéria prima para confecção de peças mais específicas com melhor aplicabilidade industrial.

Ao longo dos testes realizados percebe-se uma mudança nos aspectos tanto geométricos quanto microestruturais, pertinente a variação do avanço da ferramenta de estampagem. Isso ocorre possivelmente devido ao atrito e a geração de calor causado pela variação do avanço combinado com as altas rotações de trabalho, o que foi perceptível que para o aumento do avanço obteve-se a confecção total da geometria. Embora para avanços extremos essa geometria teve uma recuperação do material considerável, levando a entender que existe um limite ótimo para a manutenção do parâmetro de estudo. Outro quesito a se apontar é o efeito de casca de laranja (enrugamento superficial), uma textura formada devido ao contato temporário da rotação da ferramenta pontualmente dentro de um intervalo de tempo. Esse efeito foi encontrado durante todos os testes, podendo ser oriundo do movimento intermitente da ferramenta (trancos).

Analisando o quesito microestrutural do material após os ensaios de metalografia, percebe-se que a medida que se aumenta o avanço, devido o atrito e a pressão de contato, ocorreram em mudanças na microestrutura do material como por exemplo a recristalização e o aparecimento de novos grãos, além do aspecto azulado possivelmente sendo a difusão do carbono devido ao color.

Fazendo uma análise do estado de desgaste e aspecto final da superfície através dos parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_q , foi perceptível que para avanços menores obteve-se um melhor acabamento superficial, onde para avanços mais elevados é adicionado ao processo alguns mecanismos de desgaste o que acarreta em uma maior degradação superficial devido a particulados oriundos tanto das chapas quanto da ferramenta.

Contudo aponta-se algumas melhorias para o processo, sendo possível uma melhoria no quesito de fixação das chapas onde uma fixação mais rápida acarretaria em um menor tempo de parada durante o processo de troca das chapas. Outra mudança fundamental é o estudo de outros fluidos lubri-refrigerantes específicos para o processo de estampagem incremental, o que acarretaria em um melhor acabamento superficial devido a redução do atrito gerado. Outro fator importante de melhoria no processo é a transmissão de dados do computador para máquina, essa transmissão é feita por pacotes de dados seccionados, provocando pausas durante o processo, e um movimento descontínuo da ferramenta o que pode ter afetado também o estado superficial da chapa após a estampagem incremental.

Conclui-se que é necessário a utilização de avanços mais baixos para melhor acabamento superficial. Embora que, nos testes em que foram utilizados estes avanços baixos, não foi possível a finalização, devido a presença de fraturas na superfície do material. Deduz-se que faz necessário a utilização de uma rotação mais baixa para o mesmo parâmetro ou outro ajuste nas demais variáveis do processo.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBRISO6892-1 - **Materiais metálicos - Ensaio de Tração** - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2013.

BET, Luciano et al. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. 1999.

B. Lu et al. **Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed obliquer roller-ball tool**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2014. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/ijmactool>>.

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

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

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: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

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

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

DALEFFE, A. **Fabricação de Próteses Cranianas Personalizadas em Chapas de Titânio Através da Estampagem Incremental**. Porto Alegre. 2014. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/114468/000953351.pdf?sequence=1>>. Acesso em 04 de setembro de 2016.

JESWIET, J. et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, **Annals of CIRP**, v.54, p.623-650, 2005.

JESWIET, J. et al. Metal forming progress since 2000. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 1, n. 1, p. 2-17, 2008.

KIM, Y. H., PARK, J. J. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. **Journal of Materials Processing Technology**. 130-131 (2002) 42-46.

KOBAYASHI, S.; Oh, S.; ALTAN, T. **Metal forming and the finite-element method**. 1. ed.. New York: Oxford University Press, 1989.

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

LESZAK, E. **Apparatus and Process for incremental dieless forming**. Patent US 3342051 A, 1967.

MICARI, F. **Single point incremental forming**: recent results. in Seminar on Incremental Forming. 2004. Cambridge University, Cabridge.

RICHTER, A. **Comparação dos Resultados de Diferentes Testes para a Determinação da Curva Limite de Conformação**: VI Conferência Nacional de deformação de chapas, Ed Lirio Schaeffer, Porto Alegre, 2003.

SAMPAIO, A. P., MARTINS, C. A., SOUZA, P. C. **Caracterização da Conformabilidade de Aço Livre de Intersticiais**: III Conferência Nacional de Conformação de Chapas, IV Conferência Internacional de Forjamento / Brasil, Porto Alegre, 2003.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999. 267p. Bibliografia: p 122.

SILVA, A. L. da C., MEI, P. R. (1953) “**Aços e Ligas Especiais**”, Eletrometal S.A. **Metais Especiais**, 1988, Sumaré, SP.

SOUZA, S. A. de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos** - Fundamentos teóricos e práticos. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., 5 ed., 1982, página 83.

ANEXO I

Especificações Técnicas Centro de Usinagem Discovery 760

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	CENTRO DE USINAGEM DISCOVERY 760
Cabeçote vertical Cone da árvore	ISO40
Faixa de velocidade (standard)	7 a 7.500 rpm
Avanços Avanço rápido (eixos X/Y)	30 m/min
Avanço rápido (eixo Z)	20 m/min
Avanço de corte programável	1 a 15 m/min
Cursos Curso da mesa superior (eixo X)	762 mm
Curso da mesa inferior (eixo Y)	406 mm
Curso do cabeçote (eixo Z)	508 mm
Distância entre o nariz da árvore e a mesa	125 a 633 mm
Mesa Superfície da mesa	915 x 360 mm
Peso admissível sobre a mesa (uniformemente distribuído)	900 kg
Trocador automático de ferramentas (standard) Capacidade do magazine de ferramentas	22
Diâmetro máximo da ferramenta	80 mm
Diâmetro máximo da ferramenta quando os alojamentos adjacentes estão vazios	160 mm
Comprimento máximo da ferramenta	254 mm
Peso máximo da ferramenta	6 kg
Potência instalada	12,5 cv / 9KW
CNC Siemens Motor principal CA (30 min)	
Potência total instalada	15 KVA
CNC GE Fanuc Motor principal CA (30 min)	15 cv / 9 KW
Potência total instalada	20 KVA
Dimensões e Pesos (aproximados)	
Altura	2,8 m
Área ocupada (frente x lateral)	2,4 x 2,39 m
Peso líquido	3,500 kg

Fonte: Manual fornecido pelo fabricante (ROMI ®)

APÊNDICE I

Resumo do programa utilizado para estampagem incremental de chapas de aço inoxidável AISI 304 buscando obter a geometria de um tronco de cone.

```
%_N_BARRETO_MPF
;SPATH=/_N_MPF_DIR
;%_N_TESTE_DO_CONE_55_GRAUS_802D_F1000_MPF
N10 ; T13 D=10 CR=5 - ZMIN=-74.5 - ball end mill
N11 G90 G94
N12 G71
N13 G64
N14 G17
N15 G53 D0 G0 Z-110
N16 ; Contour2
N17 ;M9
N18 ;T13
N19 ;M6
N20 S1000 M3
N21 G54
N22 M9
N24 D1
N25 Z0 F100
N26 G1 Z-0.5
N27 X-56.901 Y-5.841 F1000
N28 X-56.877 Y-6.053
N29 X-56.728 Y-7.327
N30 X-56.699 Y-7.54
N31 X-56.517 Y-8.814
N32 X-56.481 Y-9.027
N33 X-56.301 Y-10.089
.
.
.
N76025 X-2.189 Y0.319
```

N76026 X-2.209 Y0.106
N76027 X-2.208 Y-0.03
N76028 X-2.207 Y-0.106
N76029 X-2.189 Y-0.319
N76030 X-2.147 Y-0.531
N76031 X-2.084 Y-0.743
N76032 X-2.018 Y-0.906
N76033 X-1.996 Y-0.956
N76034 X-1.94 Y-1.062
N76035 X-1.88 Y-1.168
N76036 X-1.805 Y-1.279
N76037 X-1.728 Y-1.381
N76038 X-1.593 Y-1.535
N76039 X-1.536 Y-1.593
N76040 X-1.381 Y-1.729
N76041 X-1.278 Y-1.805
N76042 X-1.248 Y-1.825
N76043 G17
N76044 G3 X0.293 Y-0.806 I0.56 J0.829
N76045 G0 Z0
N76047 G53 Z0
N76048 M30

APÊNDICE II

Dados amostrais de rugosidade R_a , R_z e R_q e seus respectivos valores de média e desvio padrão.

TESTES	PADRÃO			T1			T2		
	R_a	R_z	R_q	R_a	R_z	R_q	R_a	R_z	R_q
1	0,399	2,62	0,5	4,35	23	5,46	7,92	41,8	10,9
2	0,395	2,43	0,504	3,84	27,2	5,31	6,67	34,6	8,53
3	0,34	2,22	0,426	3,27	16,2	4	6,18	31,3	7,48
4	0,488	3,14	0,6	3,44	20,2	4,48	4,8	22,6	5,64
5	0,509	2,95	0,623	3,3	17,8	4,16	4,93	23,4	5,91
MÉDIA	0,4262	2,672	0,5306	3,64	20,88	4,682	6,1	30,74	7,692
DP	0,07039	0,374793	0,080528	0,457329	4,36715	0,666723	1,294469	8,026082	2,146199

TESTES	T3		
	R_a	R_z	R_q
1	9,59	43,3	11,2
2	5,04	25,7	6,04
3	5,65	26,9	6,82
4	11,3	53,5	14,2
5	6,57	32,7	8,11
MÉDIA	7,63	36,42	9,274
DP	2,695487	11,81575	3,384181

TESTES	T4		
	R_a	R_z	R_q
1	8,69	39,6	10,4
2	6,59	42,9	8,74
3	8,48	39,6	10
4	9,87	41,7	11,5
5	7,71	41,9	10
MÉDIA	8,268	41,14	10,128
DP	1,216191	1,477498	0,989404