

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Mozart Mesquita da Costa Neto

**ESTUDO DA ESTAMPABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 441 SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES MICROESTRUTURAIS**

Belo Horizonte

Fevereiro de 2024

Mozart Mesquita da Costa Neto

**ESTUDO DA ESTAMPABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 441 SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES MICROESTRUTURAIS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

Coorientador: Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva

Belo Horizonte

2024



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 3 / 2024 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.007535/2024-68

Belo Horizonte-MG, 16 de fevereiro de 2024.

Aos dezanove dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 14h00min, na sala 151 do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais-CEFET-MG, instalou-se a banca examinadora de dissertação de mestrado do aluno **Mozart Mesquita da Costa Neto**. A banca examinadora foi composta pelos professores Dr. **Gilmar Cordeiro da Silva**, PUC Minas, examinador externo, **Pedro Henrique Rodrigues Pereira**, UFMG, examinador externo, **Elaine Carballo Siqueira Corrêa**, CEFET-MG, examinadora interna e **Wellington Lopes**, CEFET-MG, orientador. O Prof. Wellington Lopes, Presidente da sessão pública da defesa de dissertação deu início a abertura dos trabalhos, que, após apresentar os membros da banca examinadora e esclarecer a tramitação da defesa, solicitou ao candidato que iniciasse a apresentação da dissertação, intitulada *Estudo da estampabilidade do aço inoxidável AISI 441 sob diferentes condições microestruturais*. Concluída a exposição, o Presidente, passou a palavra aos examinadores para arguirm o candidato; após o que fez suas considerações sobre o trabalho em julgamento tendo sido **aprovado com modificações sugeridas pela banca** o candidato, conforme as normas vigentes no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG. A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa, no prazo de 60 dias, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora conforme a Instrução Normativa POSMAT 02/23. Nada mais havendo a tratar, a Presidente declarou encerrada a sessão. Para constar, foi lavrada a presente ata que será assinada pela Presidente e demais membros da Banca Examinadora.

(Assinado digitalmente em 28/02/2024 12:16)
ELAINE CARBALLO SIQUEIRA CORREA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)

(Assinado digitalmente em 04/03/2024 15:54)
WELLINGTON LOPES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)

Matrícula: 2506564

Matrícula: 2579287

(Assinado digitalmente em 03/03/2024 12:27)

PEDRO HENRIQUE RODRIGUES PEREIRA

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.286-##

(Assinado digitalmente em 28/02/2024 20:08)

GILMAR CORDEIRO DA SILVA

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.776-##

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: 3, ano: 2024, tipo: ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO, data de
emissão: 16/02/2024 e o código de verificação: af50f3da91

RESUMO

O processo de estampagem profunda em materiais metálicos possui diversas limitações, como a profundidade estampada, aparecimento de rugas, fratura da chapa antes da deformação total, além de o sólido gerado possuir variação da espessura de parede. Considerando essas variáveis, este trabalho apresenta o estudo da estampabilidade do aço inoxidável ferrítico AISI 441 sob duas condições iniciais com o objetivo de avaliar o efeito dessa variável na conformabilidade e na resistência mecânica desse material a partir do cálculo do limite de deformação do material (LDR).

A caracterização mecânica do aço AISI 441 utilizou ensaios de tração (com identificação da anisotropia), microdureza Vickers e cisalhamento. Os resultados indicaram o efeito do estado inicial do material (como recebido e pré-deformado em laminação a frio) no limite de estampabilidade do aço AISI 441, sendo ligeiramente maior para o estado como recebido a partir da comparação do valor do LDR. Foi verificado também que o modo de deformação predominante nos copos estampados foi o estiramento.

Os resultados de estampagem associados aos dados de anisotropia indicaram a mudança da orientação preferencial segundo a fibra γ plano (111) para outra mais heterogênea após a estampagem. De modo geral, percebeu-se comportamento mecânico similar entre os produtos estampados para os dois estados analisados neste trabalho, consistindo de amaciamento no fundo e endurecimento na lateral dos copos.

Palavras-chave: aço inoxidável AISI 441. Encruamento. Embutimento profundo.

ABSTRACT

The deep drawing process in metallic materials has several limitations such as the stamped depth, appearance of wrinkles, fracture of the sheet before total deformation, in addition to the fact that the solid generated varies in wall thickness. Considering these variables, this work presents the study of the conformability of AISI 441 ferritic stainless steel under two initial conditions with the objective of evaluating the effect of this variable on the stampability and mechanical resistance of this material based on the calculation of the material's deformation limit (LDR).

The mechanical characterization of AISI 441 steel used tensile tests (with identification of anisotropy), Vickers microhardness and shear. The results indicated the effect of the initial state of the material (as received and pre-deformed in cold rolling) on the stampability limit of AISI 441 steel, being slightly higher for the as-received state based on the comparison of the LDR value. It was also verified that the predominant deformation mode in the stamped cups was stretching.

The stamping results associated with the anisotropy data indicated a change from the preferred orientation according to the fiber γ plane (111) to a more heterogeneous one after stamping. In general, similar mechanical behavior was noticed between the printed products for the two states analyzed in this work, consisting of softening at the bottom and hardening on the side of the cups.

Keywords: AISI 441 stainless steel. Work hardening. Deep drawing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	16
Figura 2 -	17
Figura 3 -	19
Figura 4 -	20
Figura 5 -	22
Figura 6 -	22
Figura 7 -	25
Figura 8 -	27
Figura 9 -	29
Figura 10 -	30
Figura 11 -	33
Figura 12 -	33
Figura 13 -	36
Figura 14 -	36
Figura 15	38
Figura 16 -	39
Figura 17 -	40
Figura 18 -	42
Figura 19 -	43
Figura 20 -	43
Figura 21 -	44
Figura 22 -	45
Figura 23 -	47
Figura 24 -	48
Figura 25 -	48
Figura 26 -	49
Figura 27-.....	50
Figura 28-.....	51
Figura 29 -	52
Figura 30 -	53
Figura 31 -	55

Figura 32 -	56
Figura 33 -	57
Figura 34 -	58
Figura 35 -	60
Figura 36 -	62
Figura 37 -	63
Figura 38 -	63
Figura 39 -	65
Figura 40 -	66
Figura 41 -	67
Figura 42 -	68
Figura 43 -	70
Figura 44 -	70
Figura 45 -	71
Figura 46 -	72
Figura 47 -	73
Figura 48 -	73
Figura 49 -	76
Figura 50 -	78
Figura 51 -	80
Figura 52 -	81
Figura 53 -	82
Figura 54 -	83
Figura 55 -	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.....	54
Tabela 2.....	67
Tabela 3.....	69
Tabela 4.....	69
Tabela 5.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
AU	Alongamento Uniforme
DEMAT	Departamento de Engenharia de Materiais
DL	Direção original de laminação
G	Tamanho de Grão ASTM
LE	Limite de Escoamento
LE _c	Limite de Escoamento em Cisalhamento
LRT	Limite de Resistência em Tração
MET	Microscópio Eletrônico de Transmissão
P	Carregamento Cisalhante
R	Coefficiente R de Lankford
TG _m	Tamanho de Grão Médio
WH	Work-hardening
t	Espessura final
t _o	Espessura inicial
w	Largura final
w _o	Largura inicial
LDR	Limit Drawing Ratio (Taxa limite de deformação)
RCD	Razão Crítica dos Diâmetros
DL	Direção de Laminação
D ₀	Diâmetro do blank
d	Diâmetro do copo gerado
F _{BH}	Força de sujeição;
A _{BH}	Diferença entre áreas disco a ser estampado (D ₀) e D _s
d _e	Soma entre o diâmetro da matriz D _R e 2r _m
D _R	Diâmetro da matriz
r _m	Raio de entrada da matriz;
p	Pressão de sujeição;
D _c	Diâmetro final do copo estampado;

D_p	Diâmetro do punção;
t	Espessura do blank a ser estampado;
w	Folga entre o punção e a matriz;
(R)	Coeficiente de anisotropia normal
R_{0°	Coeficiente de anisotropia planar sentido 0° laminação
R_{45°	Coeficiente de anisotropia planar sentido 45° laminação
R_{90°	Coeficiente de anisotropia planar sentido 90° laminação

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔR	Coeficiente de anisotropia planar
γ	Deformação Cisalhante
τ	Tensão Cisalhante
σ_{efetiva}	Tensão Efetiva
ϵ_w	Deformação na largura
ϵ_t	Deformação na espessura
$\epsilon_{\text{efetiva}}$	Deformação Efetiva
β	Taxa de estampagem ;
σ_{μ}	Tensão última ou tensão de ruptura;
α	Fase ferrita alfa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivos específicos.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 Conceitos básicos.....	16
3.1.1 <i>Conformação Mecânica</i>	16
3.1.2 <i>Laminação</i>	20
3.2 Estampagem	24
3.2.1 <i>Estampagem profunda</i>	32
3.2.2 <i>Defeitos na Estampagem Profunda</i>	34
3.3. Ensaio Simulativos.....	41
3.3.1 <i>Ensaio Nakazima</i>	42
3.3.2 <i>Ensaio Marciniak</i>	44
3.4 Avaliação de deformações e obtenção da curva limite de deformação	45
4 MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1. Material.....	54
4.2. Fluxograma	55
4.3. Laminação à frio	55
4.4. Caracterização Mecânica.....	56
4.4.1 <i>Ensaio de tração</i>	56
4.4.2 <i>Microdureza Vickers</i>	58
4.4.3 <i>Ensaio de cisalhamento</i>	58
4.5. Caracterização Estrutural	61
4.5.1 <i>Microscopia optica</i>	61
4.5.2 <i>Difração de raios x</i>	61
4.5.3 <i>EBSD</i>	61
4.6. Ensaio Simulativo.....	62
4.6.1 <i>Estampagem</i>	62
4.6.2 <i>Marcação blanks e medição da deformação dos copos</i>	63
4.6.3 <i>Montagem da curva CLC</i>	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	66

5.1 Caracterização Mecânica	66
5.2 Caracterização Estrutural	69
5.2.1 Microscopia óptica	69
5.2.2 <i>Difração de raios X</i>	70
5.3 Estampagem	71
5.3.1 <i>LDR</i>	71
5.3.2 <i>Comportamento mecânico</i>.....	75
5.3.3 <i>Deformação Plástica na Estampagem</i>.....	79
5.4 Textura	82
6 CONCLUSÕES	88
REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

A demanda cada vez maior de produtos estampados, com requisitos de propriedades específicas, exigiu um aprimoramento dos processos de fabricação e, principalmente das características dos diferentes tipos de materiais, de modo a atender essas necessidades, sendo isso aplicado desde os produtos de uso simples, como cubas de cozinha ao mais elaborado, como componentes de veículos com intuito de aumentar a produtividade, reduzir retrabalhos e o desperdício.

A constante evolução dos métodos de transformação de materiais para atender as demandas cada vez maiores de produtos industriais são uma premissa fundamental para o desenvolvimento e otimização dos processos de conformação. A estampagem de chapas para se obter sólidos de uso simples até mais elaborado requer um estudo para que materiais com características específicas possam ser adequados para processos otimizados.

Neste caso, a escolha adequada de materiais constitui um requisito importante para o melhor aproveitamento das operações de conformação. O uso, por exemplo, de aços inoxidáveis, como o AISI 441, possibilita a combinação de propriedades como resistência à corrosão e conformabilidade, que podem ser o diferencial em diversas operações de estampagem. Considerando isso, o aço inoxidável AISI 441 possui em sua composição estabilizadores da fase ferrita (α), além do cromo, tais como o titânio (Ti) e o nióbio (Nb). Esses elementos conferem ao material maior conformabilidade e resistência considerável à corrosão, como a intergranular mesmo sob solicitação à temperaturas em torno de 900°C (JUUTI et al, 2019).

Baseado nas propriedades e no campo de utilização desse material, essa proposta de pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito do estado inicial na estampabilidade do aço inoxidável AISI 441.

2 OBJETIVO GERAL

Estudar a estampabilidade do aço inoxidável ferrítico AISI 441 nos estados como fornecido pela usina e laminado a frio.

2.1 Objetivos específicos

- Analisar os efeitos das condições iniciais no aço AISI 441, no limite de deformação, a partir das medições realizadas e posterior cálculo da razão limite de deformação (*Limit Drawing Ratio*), LDR;
- Avaliar o comportamento mecânico do aço AISI 441 antes e após a estampagem por meio dos ensaios de tração e cisalhamento;
- Investigar a estampabilidade do aço AISI 441 a partir de blanks com diâmetro variando de 5 mm em 5 mm desde 80 mm a 115 mm.

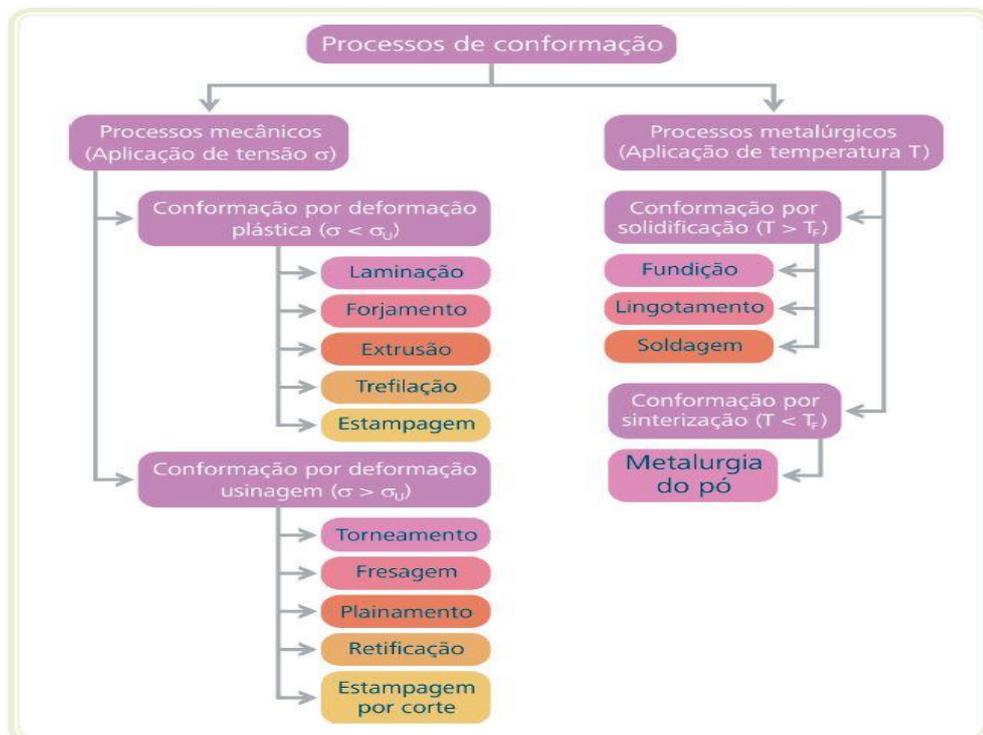
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Conceitos Básicos

3.1.1 Conformação Mecânica

Os processos de fabricação por conformação mecânica são os elos finais de uma corrente que se inicia no processo de extração do minério de ferro da crosta terrestre, transformação da matéria-prima em aço para posterior processamento por conformação, sendo através destes processos que se obtêm muitos produtos empregados no cotidiano em equipamentos e máquinas de modo geral. Uma chaleira, uma panela, um tanque de combustível de um foguete espacial, uma prótese de fêmur, um virabrequim de navio ou de automóvel são exemplos simples de aplicações de produtos de diferentes processos de conformação mecânica, como mostrado na Figura 1 (SCHAEFFER, 2017).

Figura 1- Quadro geral de classificação dos processos de conformação dos metais

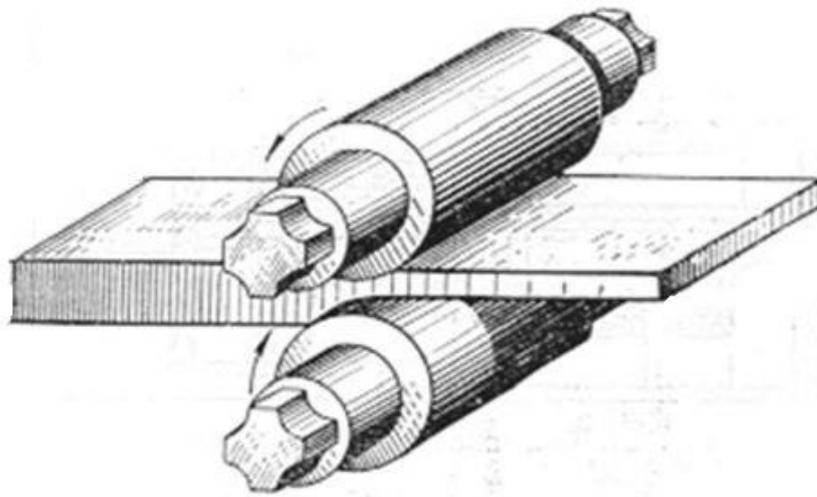


Fonte: Garcia (2000).

Com o avanço dos anos, com desenvolvimento de novos equipamentos, principalmente aqueles que possibilitam a fabricação de peças sob altíssima velocidade, a produção de componentes por conformação mecânica exibiu uma diminuição dos custos. Este fato contribuiu ainda para a alta competitividade de muitos produtos de origem metálica, possibilitando, por exemplo, o aumento da produtividade (SCHAEFFER, 2004).

As propriedades de deformação fazem com que o material alcance à forma desejada com a aplicação de uma força mecânica. Ocorrem modificações na estrutura do material como a diminuição do tamanho de grão e aumento da resistência ao escoamento, devido ao tamanho de grão (ALTAN; TEKKAYA, 2012), como os empregados na laminação, a qual pode ser conduzida sob trabalho a frio, a morno e a quente mediante a aplicação de esforços compressivo cisalhantes com uso de cilindros de laminação, Figura 2, constituindo um dos processos mais comuns de conformação mecânica.

Figura 2- Esquema do processo de laminação



Fonte: Faria et al (2019, p.6).

As chapas metálicas podem possuir anisotropia das propriedades em função da direção, exibindo assim, respostas diferentes quando essas características são analisadas na própria direção de laminação, assim como nas direções normal e transversal.

Para Lankford et al (1950), a anisotropia normal média é designada pela razão entre a deformação verdadeira na direção da largura e a deformação verdadeira na direção da espessura em um teste de tração que determina o coeficiente **R** de Lankford conforme a Equação (1).

$$R = \frac{\ln\left(\frac{W_0}{W_f}\right)}{\ln\left(\frac{l_0 \cdot W_0}{l_f \cdot W_f}\right)} \quad (1)$$

l_0 e l_f são respectivamente, comprimento inicial e final

W_0 e W_f são respectivamente, largura inicial e final;

Sendo assim, com a utilização do coeficiente **R** de Lankford, tem-se algumas relações conforme Equações (2), (3) e (4) que indicam a condição ao qual o material se encontra no quesito da avaliação qualitativa de anisotropia encontrada no material em análise, as equações que seguem demonstram essas relações:

$$R_0 = R_{45} = R_{90} = 1: \text{Isotropia total}; \quad (2)$$

$$R_0 = R_{45} = R_{90} \neq 1: \text{Isotropia plana e anisotropia normal pura}; \quad (3)$$

$$R_0 \neq R_{45} \neq R_{90} \neq 1: \text{Anisotropia plana e anisotropia normal}. \quad (4)$$

De acordo com Ferreira (2005), a medição da anisotropia emprega corpos de prova de tração que são retirados a 0°, 45° e 90° em relação à direção original do material, ou seja, R_0 , R_{45} e R_{90} , e conforme as relação supracitadas.

Tem-se confirmado por Suwas (2014), que para uma chapa resistir ao afinamento durante uma operação de estampagem, esta deve exibir valores elevados de anisotropia normal, (R), Equação (5):

$$(R) = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4} \quad (5)$$

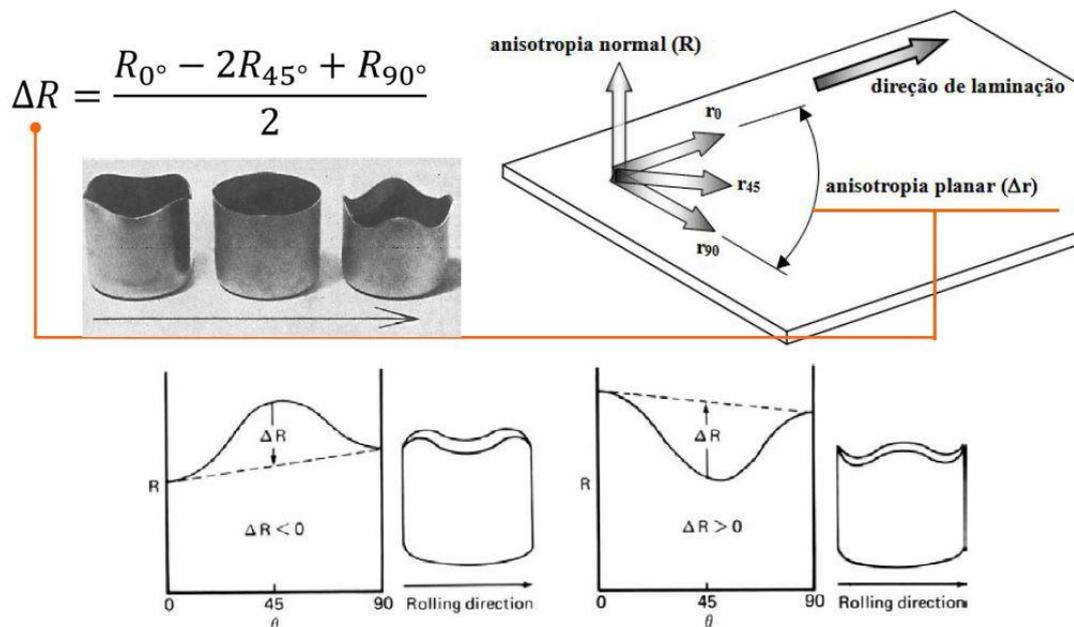
O coeficiente de anisotropia planar (ΔR) é determinado pela Equação (6), sendo que, para se obter produtos estampados de qualidade e confiabilidade, tem-se a premissa

de que o valor de (R) deve ser o mais alto possível, ao passo que, o valor de (ΔR) precisa ser o mais baixo, resultando assim na deformação plástica da chapa de forma controlada, minimizando o aparecimento de defeitos que possam ocorrer no processo de conformação(SUWAS, 2014).

$$\Delta R = \frac{R_{0^\circ} + R_{90^\circ} - 2R_{45^\circ}}{2} \tag{6}$$

Essa variação da propriedade no plano da chapa é chamada de anisotropia planar (ΔR) e na direção normal, anisotropia normal (R), como indicado na Figura 3, que também exibe a morfologia de um copo com a variação desses parâmetros.

Figura 3- Aspectos de um copo estampado em função das anisotropias planar (ΔR) e Normal (R)



Fonte Faria et al (2019, p.32).

A capacidade de uma chapa de ser estampada profundamente sem o aparecimento de rupturas caracteriza a propriedade estampabilidade. Esta depende, em grande parte, da resistência ao afinamento da chapa durante o processo.

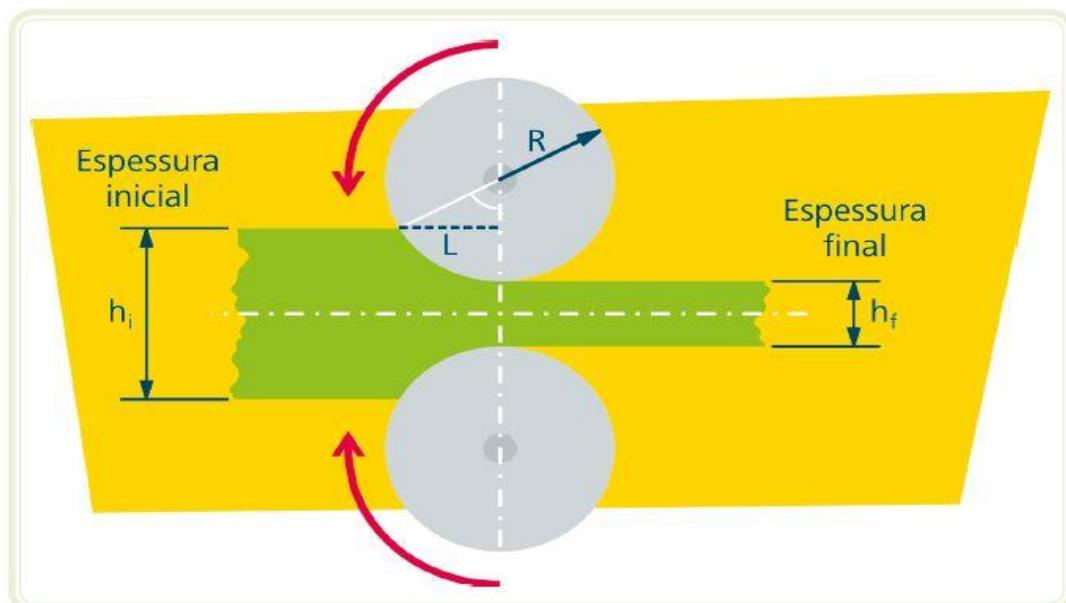
A conformabilidade de um material é determinada, geralmente, em ensaios de tração onde se ensaia o material em diferentes direções referentes à direção de laminação (BANABIC,2010).

O desenvolvimento tecnológico nas áreas de engenharia é o que permite que diferentes processos de conformação mecânica se desenvolvam e expandam sua capacidade. As subáreas de laminação e estampagem são amplamente utilizadas na indústria na produção de chapas, carenagens, estruturas, carrocerias de automóveis e até mesmo fuselagem de aviões.

3.1.2 Laminação

A laminação é um processo mecânico onde um material é conformado entre rolos sofrendo deformação plástica devido a tensões compressivas indiretas, auxiliadas por tensões de cisalhantes, ocasionadas pela motorização dos cilindros, a força de atrito entre o material e os cilindros de laminação é a responsável por essa deformação. Neste processo a seção é modificada em forma de barra, lingote, chapa ou fio. A Figura 4 representa este processo (FERREIRA, 2010).

Figura 4- Ilustração do processo de laminação



Fonte: Filho (1991).

Onde se tem que:

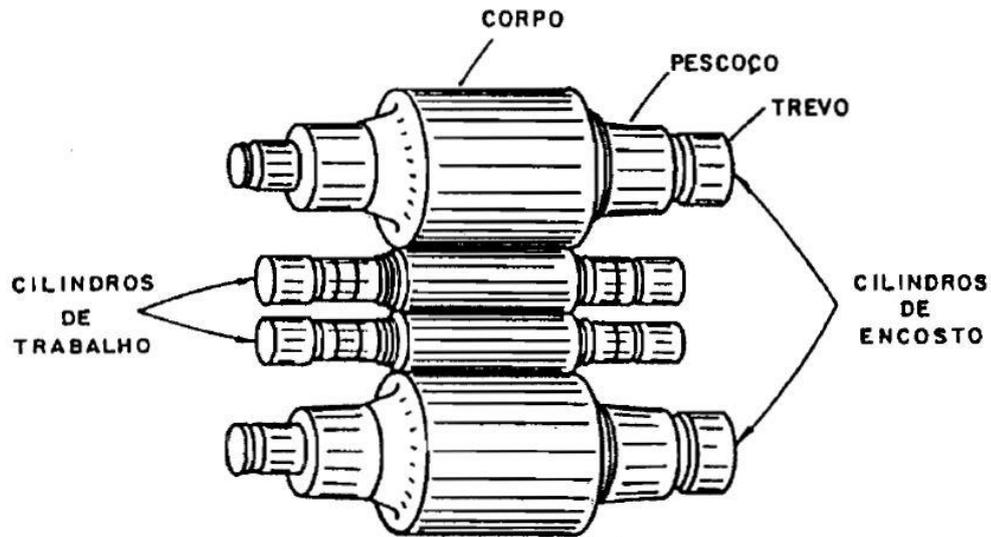
- hi espessura inicial;
- hf espessura final;
- R raio do cilindro de laminação;
- L comprimento do arco de contato.

A passagem de um material pelos cilindros ocorre pela ação da força de atrito na superfície de contato entre o material e os cilindros. Essa força é proporcional ao coeficiente de atrito entre o material e o cilindro e à força normal na superfície de contato. A força normal dividida pela área da superfície de contato é a pressão exercida pelos cilindros que, por sua vez, resulta na resistência à deformação plástica do material nas condições de processamento (temperatura e velocidade de trabalho).

O processo de laminação pode ocorrer a frio, quando a temperatura de trabalho é menor que a temperatura de recristalização e a quente, onde a temperatura de trabalho é maior que a temperatura de recristalização do material (FERREIRA, 2010). O trabalho a frio acrescenta maior resistência mecânica e dureza a liga, melhor acabamento superficial e tolerâncias mais estreitas. Para isso exige elevadas forças e potências na conformação dos materiais. Os grãos resultantes são achatados, alongados e anisotrópicos (estrutura de grãos orientados). O trabalho a quente necessita de menores forças e potências do maquinário e permite maiores deformações do material e grãos isotrópicos (GROOVE, 2014).

Na Figura 5 é exibido um esquema simplificado de um laminador quádruplo onde se observa um conjunto com quatro cilindros, sendo dois externos maiores, denominados cilindros de apoio e os outros dois internos são os cilindros que têm contato com a chapa, os cilindros de trabalho.

Figura 5- ilustração de um laminador quádruo



Fonte: Filho (1997).

Na laminação a quente a peça é comumente um lingote fundido obtido por meio do lingotamento convencional, A temperatura de trabalho está acima da temperatura de recristalização da peça, de modo a reduzir a resistência à deformação plástica em cada passe e permitir a recuperação da estrutura do material, evitando que ocorra encruamento para os passes seguintes((MOURAO et al., 2007).

Figura 6- chapa laminada a quente em forma de bobina para estampagem



Fonte: Faria et al (2019, p.12).

Os materiais comercializados como produtos laminados a quente não decapados apresentam sobre a superfície uma camada de óxido de ferro naturalmente formada durante o processo.

De acordo com Coda (2000), a temperatura de início da laminação a quente dos aços está entre 1100°C e 1200°C. A qualidade do produto é consequência do aquecimento de forma precisa e controlada dos aços a serem laminados (BEUREN, Jair; TRAVI, Tatiana, 2000).

Durante a fase de aquecimento dentro de um processo de reaquecimento, considera-se três variáveis descritas abaixo com controle mais rigoroso, que são:

- Temperatura máxima de aquecimento;
- Velocidade de aquecimento;
- Tempo de permanência da peça na temperatura máxima.

Os padrões de controle dessas variáveis devem ser rígidos a ponto de variar de acordo com as características microestruturais do aço (BEUREN; TRAVI, 2000).

A temperatura de aquecimento é mantida em um padrão com pouca variação, sendo quase fixa de acordo com a natureza do processo, das propriedades e das estruturas finais desejadas, da composição química do aço e, principalmente, do seu teor de carbono.

A influência do tempo de permanência do aço à temperatura de aquecimento é próxima à máxima temperatura de aquecimento, isto é, quanto mais longo o tempo à temperatura considerada de austenitização, tanto mais completa a dissolução do carbono em ferro ou outras fases presentes, tais como carbonetos complexos e formados com os elementos de liga do aço, entretanto maior o crescimento de grão resultante (CHANDLER, 1995).

Por outro lado, na laminação à frio a peça inicial para o processamento, nesse caso, é um produto semiacabado (chapa), previamente laminado à quente. Como a temperatura de trabalho (temperatura ambiente) situa-se abaixo da temperatura de

recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação e um aumento dessa resistência com a deformação (encruamento), não permitindo, dessa forma, intensidades elevadas de redução de seção transversal.

Um tratamento térmico de recozimento, entre uma e outra sequência de passes, pode se tornar necessário em função do programa de redução estabelecido e das propriedades exigidas do produto. A laminação à frio é aplicada, portanto, para as operações finais (acabamentos), quando as especificações do produto indicam a necessidade de acabamento superficial superior (obtido com cilindros mais lisos e na ausência de aquecimento, o que evita a formação de cascas de óxidos) e de estrutura do metal encruado com ou sem recozimento final.

As temperaturas de laminação e as de recozimento têm seus limites, superior e inferior, definidos criteriosamente em função do tipo de material a ser processado e das condições de cada processamento em particular (FILHO,1997).

Os Produtos Planos Laminados a Frio são obtidos a partir de Bobinas Laminadas a Quente Decapadas que sofrem redução de espessura em um Laminador de tiras a Frio. O aço é severamente encruado nesta etapa e resgata a ductilidade nos processos subsequentes de recozimento de acordo com os requisitos de propriedades mecânicas e características superficiais desejados.

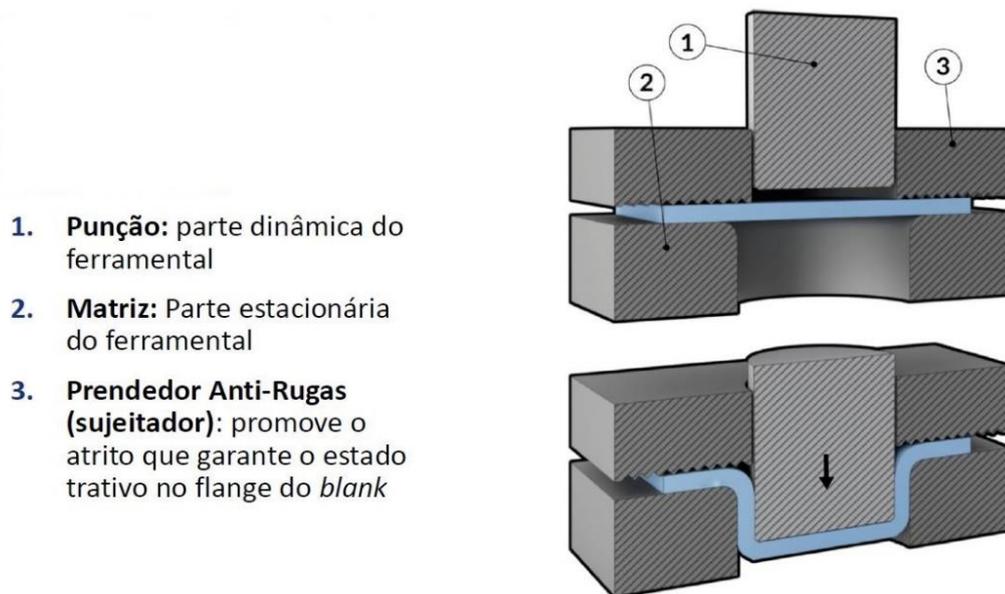
3.2 Estampagem

A estampagem é amplamente utilizada por diversos setores da indústria, sendo um dos principais processos de conformação de chapas metálicas. Há uma ampla gama de peças fabricadas no setor automobilístico, tais como painéis de porta, capô, tampas, dentre outros. Este processo é igualmente empregado na manufatura de partes utilizadas nas asas e fuselagens no setor de aviação, bem como na fabricação de utensílios domésticos, como por exemplo, panelas, bandejas e vasilhames.

A estampagem é definida como sendo todo processo que envolve operações de corte e de conformação, onde uma chapa é submetida a uma ou mais transformações de

deformação plástica, com a finalidade de se obter sólidos de revolução (SHAEFFER,2017). A deformação controlada pela ação da carga aplicada pelo prensa chapas, que faz com que não apareçam rugas no sólido gerado. O conjunto ferramental é constituído por três elementos básicos: matriz, punção e prensa-chapas ou sujeitador. Para a estampagem de peças cilíndricas as principais dimensões são: o diâmetro do punção e da matriz, os raios de canto (punção e matriz) e a folga radial do conjunto matriz e punção, Figura 7. A folga radial poderá ser superior, igual ou inferior à espessura da chapa, dependendo das necessidades do processo (ALTAN; TEKKAYA, 2012).

Figura 7- Esquema de um processo típico de estampagem.



Fonte: Faria et al (2019, p.15).

O processo de estampagem, como definido por Rodrigues e Martins (2005), tem o seu início quando o punção entra em contato com a chapa que se encontra presa entre a matriz e o prensa-chapas, gerando deformações elásticas. Com o contínuo avanço do punção, deformações plásticas começam a ocorrer nas zonas do fundo e do raio do punção, reduzindo a espessura da chapa nestes locais. Quando se iniciam as deformações plásticas na área da aba tem-se o término da primeira fase de estampagem. Com o início da segunda fase, as zonas do fundo e do raio de canto do

punção voltam a trabalhar em regime elástico. O processo é concluído quando todo o material se encontra no interior da matriz.

O limite de deformação em um material pode ser avaliado por meio da razão crítica dos diâmetros, LDR, *Limit Drawing Ratio*, que é um parâmetro que considera a razão entre o máximo diâmetro do blank sem se romper (diâmetro da chapa cortada na forma de disco, por exemplo) pelo diâmetro do punção, Equação (7) (LEU,1999):

$$LDR = \frac{D_0}{D_p} \quad (7)$$

D_0 = diâmetro do blank;

D_p = diâmetro do punção.

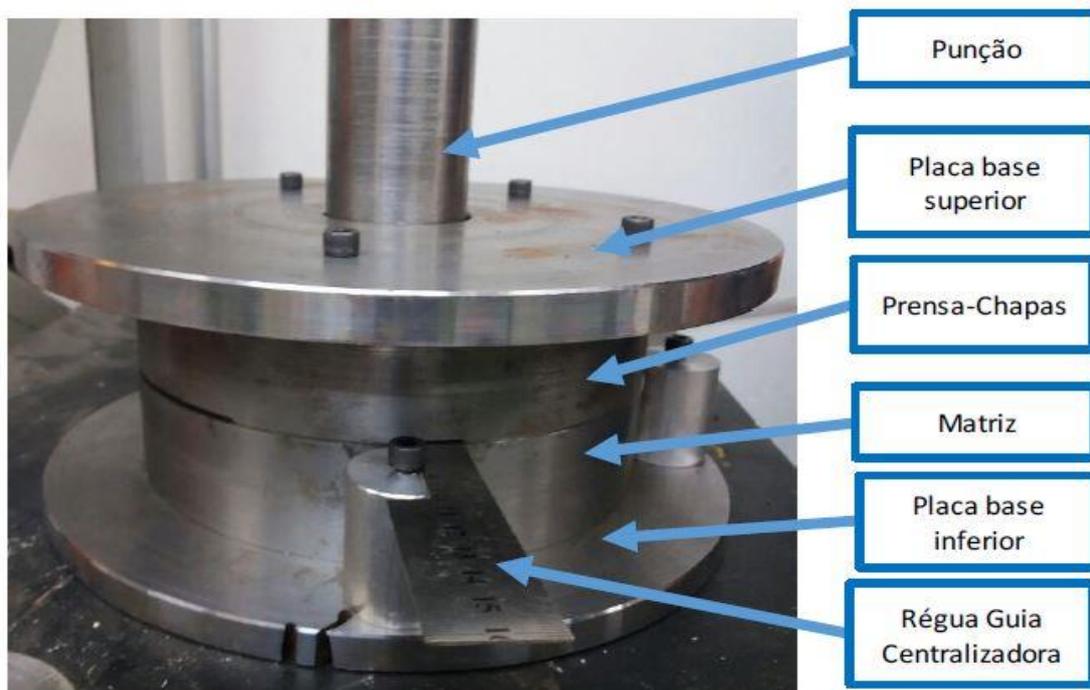
Verma e Chandra (2006) sugerem o teste simulativo Swift (*Swift Cup Test*) como um ensaio simulativo para a determinação do LDR de um material, sendo possível simular as condições de produção, sendo adotados os seguintes procedimentos:

- Os raios de canto do punção e da matriz devem ter o valor de $\frac{1}{4}$ pol., ou seja, 6,35mm;
- O raio de canto da matriz e a sua superfície devem possuir baixa rugosidade, sendo polidos;
- As superfícies em contato com o blank (blank/matriz e blank/prensa-chapas) devem estar totalmente lubrificadas;
- O punção deve estar limpo e isento de lubrificação;
- A pressão do prensa-chapa deve ser suficiente para prevenir o surgimento de enrugamento, porém não excessiva;
- A folga entre o punção e a matriz dependerá da espessura da chapa.

Neste ensaio o diâmetro utilizado para o punção é de 50 mm, o recomendado que a chapa utilizada nos testes tenha espessura de 0,60 mm, sendo sugerida folga radial de 0,70 mm para um diâmetro da matriz de 51,4 mm (DIETER,1984).

O valor de LDR experimental para um material é determinado após sucessivas estampagens na matriz de ensaio Swift, conforme Figura 8 abaixo, onde o diâmetro do blank é aumentado até que se tenha a fratura do material ensaiado. Dentre os valores encontrados na literatura para o LDR se tem uma aproximação de $2 \pm 0,20$ para o aço inoxidável AISI 441, sendo utilizado na maioria dos ensaios de 6 a 10 blanks, variando o diâmetro em incrementos, por exemplo de 1 mm (DIETER,1984).

Figura 8- Matriz para ensaio Swift



Fonte: Silva (2018).

De acordo com Schaeffer (2017), no procedimento de confecção das peças por conformação plástica a partir de chapas sempre haverá corte de regiões internas ou externas da peça a fim de eliminar material sobressalente ou de atuar na construção da peça com furos, oblongos, rasgos e ranhuras. A operação de estampagem tem por

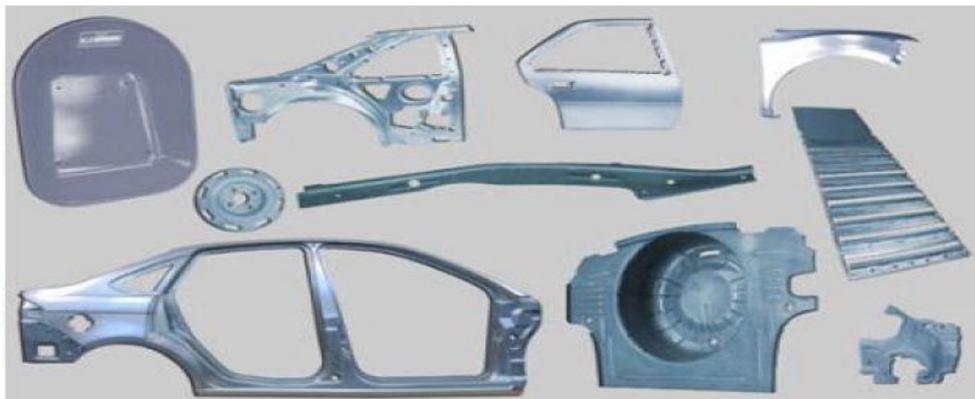
premissa a utilização de material contínuo na forma de bobinas que são alimentadas automaticamente ou de modo intermitente, como na estampagem de discos por embutimento e à medida que as chapas alimentam as prensas, executam-se as bateladas (compressão) como parte do ciclo de estampagem do material.

O processo de estampagem de chapas metálicas é controlado por diversos fatores de natureza mecânica e metalúrgica. Entre os esforços de natureza mecânica pode-se mencionar: a forma e a dimensão da peça, a máquina de conformação (o tipo de prensa), a forma e dimensões das ferramentas (punção e matrizes) e as condições de lubrificação. Esses fatores têm influência direta na definição dos estados de tensão e deformação existentes em cada região da peça em formação. O estado de tensão, por exemplo, altera as condições de escoamento e, portanto, de comportamento plástico do material da peça (FILHO,1997).

Os fatores de natureza metalúrgica, relacionados ao material da peça, são, por exemplo, a composição química e a estrutura, fatores estes que dependem, por sua vez, dos processos de fabricação e de laminação associados aos tratamentos térmicos de recozimento, que afetam as propriedades mecânicas do material da chapa que são de importância fundamental em seu comportamento de estampagem. De natureza metalúrgica cita-se ainda a influência dos tratamentos térmicos de recozimento intermediário quando o processo é dividido em diversas etapas de estampagem, além de se considerar a anisotropia planar que pode conferir defeitos (orelhas) na peça pronta (PENEDO,2023).

Para Faria et al (2019), no que se refere à forma da peça, pode-se afirmar que, quanto mais complexa for, mais difícil será a determinação dos esforços necessários à conformação e aos limites máximos admissíveis de deformação plástica, ou seja, da estampabilidade do material, permitindo a obtenção de diversos tipos de produtos, como exibido na Figura 9.

Figura 9- Gama de geometrias possíveis obtidas pelo processo de estampagem



Fonte: Faria et al (2019, p.16).

O estudo da estampagem de um copo, a partir de um esboço na forma de um disco plano, corresponde à uma condição simplificada, porém típica, do processo de estampagem. Nessa condição, no que se refere ainda à forma e às dimensões da peça, é importante estabelecer a redução das dimensões, em termos de relação percentual, entre a diferença do diâmetro do disco e do diâmetro do copo, em relação ao diâmetro do disco.

Para Souza (2014), a redução máxima admissível, isto é, aquela que não provoca a ruptura da chapa, indicada pelo valor do LDR, é um índice da estampabilidade, fornecendo um valor máximo entre o diâmetro do blank e do punção sem causar a ruptura da chapa. Tal parâmetro pode ser calculado para cada passe de estampagem em operações com mais de um ciclo, sendo chamado de taxa de estampagem, β , Equação (8), assim como para especificar o limite de estampagem de um material quando o processo envolve mais passes para obtenção do produto, usa-se o $\beta_{\text{máx}}$, sendo que com mais passes tem-se a condição de poder inserir detalhes ao produto, sendo possível prever tal índice de acordo com a espessura e tipo de material, com

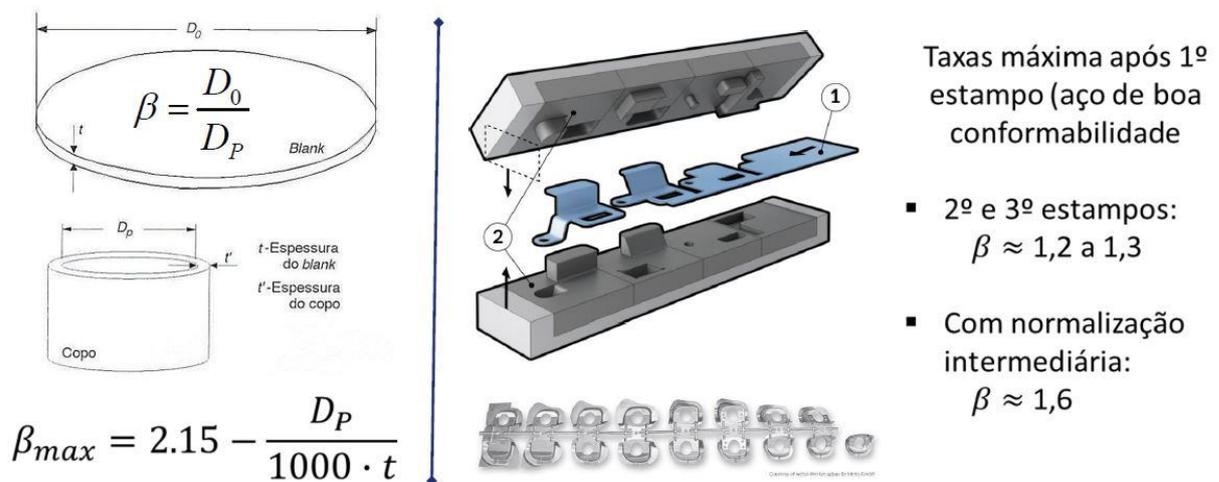
modelos específicos para os tipos de aços existentes, como no caso de chapas de aço de baixo teor de carbono, como exemplificado na Equação (9) e Figura 10:

$$\beta = D_0 / d_p \quad (8)$$

$$\beta_{\text{máx}} = 2,15 - [(d_p) / (1000 \cdot t)] \quad (9)$$

t = espessura da chapa (mm).

Figura 10- Taxa de estampagem (β)



Fonte: Faria et al (2019, p.26).

A conformação de peças a partir de chapas pode ser feita utilizando-se prensas mecânicas ou hidráulicas. Para a estampagem profunda, são preferidas as prensas hidráulicas de dupla ação, pois estas conferem ao processo condições de velocidade de deformação controlada e constante, e uma maior uniformidade na aplicação do esforço mecânico necessário à conformação (FARIA,2019).

A capacidade da prensa é determinada comumente em função do cálculo da máxima força necessária à fabricação de uma peça, com uso de expressões empíricas que permitem calcular, superestimando, a força máxima de conformação. A velocidade da prensa depende de algumas das condições de operação, tais como: tipo de material da chapa, forma da peça (particularmente, quanto à simetria) e natureza do

lubrificante. Em condições ideais, a velocidade adotada para a estampagem pode alcançar 22 m/min, mas comumente fica entre 6 e 16 m/min (FILHO,1997).

A ferramenta de conformação também afeta a operação de estampagem, como os valores dos raios do punção e da matriz. Enquanto o dobramento da chapa sobre o raio de concordância do punção é praticamente estacionário, mas o dobramento sobre o raio da matriz de estampagem profunda ocorre um intenso deslizamento da chapa. Tal fato demonstra a importância de se considerar o raio da matriz como um fator de influência no processo de estampagem. Esses raios devem ser suficientemente grandes para não elevar o esforço de conformação que poderia reduzir a capacidade de estampagem de uma determinada peça.

Verifica-se que, por exemplo, se o raio do punção aumentar de um para cinco vezes o valor da espessura da chapa de aço, a força de deformação é reduzida, permitindo a estampagem, sem fratura dos copos.

A folga entre o punção e a matriz tem muita importância no processo de estampagem: a força de estampagem é mínima quando a folga atinge a dimensão de 1,15 a 1,20 do valor da espessura da chapa, pois, nessas condições, não deve haver contato forçado entre o copo em formação e as paredes laterais do punção e da matriz (admite-se que a chapa aumenta de 7 a 15% em espessura quando entra na cavidade da matriz). Quando a folga diminui, a força de estampagem aumenta, podendo ocorrer um segundo ponto máximo, em nível mais baixo e mais adiante, na curva de força de estampagem versus percurso do punção (FILHO,1997).

A lubrificação concorre decisivamente para reduzir os esforços de atrito entre a chapa e a matriz e entre o punção e o sujeitador (prensa chapas). A natureza do lubrificante é determinada em função do nível do esforço de conformação e da necessidade de poder ser retirado da peça, após a conformação, com relativa facilidade. Essas características são comumente contraditórias, uma vez que os lubrificantes que suportam melhor as elevadas pressões de conformação não permitem a aderência entre a chapa e as partes da ferramenta, ocasionando dificuldade para a remoção da chapa para a remoção posterior.

Segundo Marcondes (2003), os efeitos funcionais dos lubrificantes são:

- Reduzir os carregamentos necessários para a deformação;
- Aumentar os limites de deformação antes da fratura;
- Melhorar o controle do acabamento de superfície;
- Minimizar a adesão do metal no ferramental;
- Minimizar o desgaste das ferramentas;
- Isolar termicamente as peças e ferramentas;
- Resfriar as peças e ferramentas.

3.2.1 Estampagem profunda

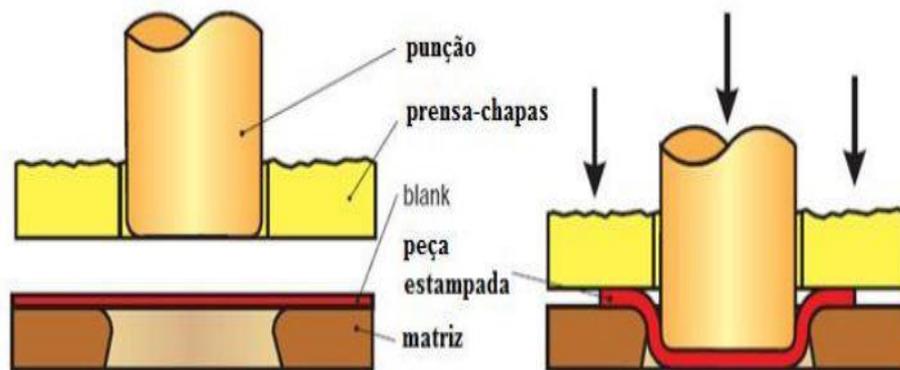
O processo de estampagem profunda ou embutimento profundo são adotados amplamente na confecção de diversos produtos, devido à alta produtividade de peça (dependendo da complexidade da peça), e dependendo dos esforços envolvidos para que seja executado o processo de deformação plástica, se faz necessário o uso de ferramentas de aço de alta resistência. Os componentes para este método são constituídos de matriz, prensa-chapas e punção (DUDHTA, et al. 2017; TIWARI, RATHORE, BODJHE. 2022).

Em decorrência da uniformidade geométrica e na eminência de presença de anisotropia planar, as tensões existentes em qualquer plano vertical, passando pelo eixo de simetria, são iguais, e as possibilidades de aparecimento de enrugamento no flange, durante a estampagem, ou de fissura, na região lateral adjacente ao fundo do copo, são as mesmas. É essa uniformidade dos estados de tensão que caracteriza a verdadeira estampagem em oposição à conformação de caixas, em que a distribuição de estados de tensão ao longo dos planos verticais de corte das peças, passando pelo seu centro, é diferente para os diversos planos.

O embutimento é realizado com uso de um punção, uma matriz e um prensa chapas para evitar que haja enrugamento no flange quando o material está fluindo para dentro da matriz pela ação do punção. Também a relação entre as forças exercidas pelo punção e pelo prensa chapas é muito importante na formação de rugas, além da lubrificação já que a chapa deve deslizar entre a matriz e o prensa chapas. O

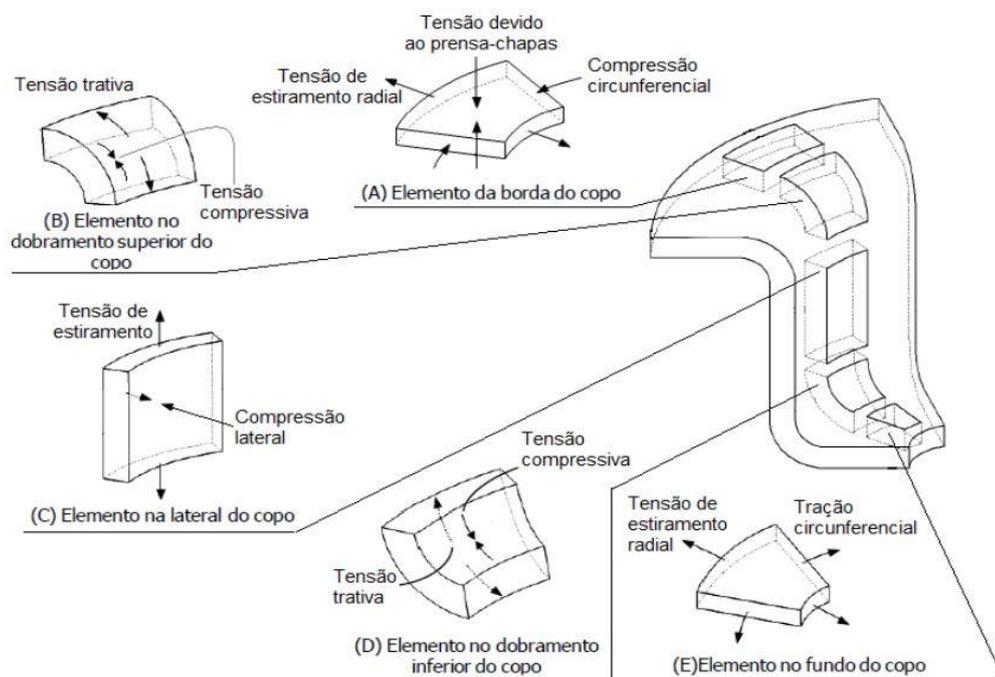
estiramento sob o punção é pequeno e grande parte da deformação está no flange, e como esta ocorre sob tensões de compressão, grandes deformações podem ser obtidas, sendo possível conformar um copo com a altura igual ou até ligeiramente maior que o diâmetro do mesmo conforme demonstrado na Figura 11 (SCHULER,1993).

Figura 11- Esquema simplificado do processo de embutimento



Fonte: Schuler (1993).

Figura 12- Esforços atuantes em diversas regiões de um copo



Fonte: Adaptado de Garcia et al (2000).

Na região da aba ocorre uma redução gradativa da circunferência do disco à medida que sua região central penetra na cavidade da matriz. Nessa região atuam esforços, na direção das tangentes dos círculos concêntricos à região central, denominados de compressão circunferencial e que tendem a enrugar a chapa. Para evitar esse enrugamento, aplica-se uma tensão de compressão com uso de um sujeitador, denominada pressão de sujeição conforme demonstrado na Figura 12, acima.

3.2.2 Defeitos na estampagem profunda

De acordo com Faria (2019), alguns dos principais defeitos encontrados em peças embutidas originam-se basicamente de defeitos preexistentes na chapa, de defeitos no projeto e construção da ferramenta e de defeitos na conservação das ferramentas. Os principais defeitos em peças embutidas, classificados como sendo dos tipos 1, 2 ou 3, as causas, as recomendações para a sua prevenção seguem abaixo, e alguns destes defeitos estão ilustrados na Figura 13.

- **Pregas** (gretas transversais no corpo): inclusões na chapa / na laminação, trabalhar com materiais mais puros (tipo 1);
- **Furos alongados ou gretas**: poros finos na chapa ou corpos estranhos duros (exemplo, grãos de areia) que penetram durante a estampagem no interior dela / cuidar da limpeza dos locais de armazenamento da chapa (tipo 1);
- **Diferença de espessuras na chapa**: aba de largura irregular formam-se gretas entre as regiões da aba de diferentes espessuras ou cilindros desgastados / exigir produto laminado com tolerâncias dimensionais estreitas (tipo 1);
- **Desprendimento do fundo**: o punção de embutir atua como punção de corte, o raio de curvatura é muito pequeno no punção e na aresta embutida / arredondar melhor as arestas do punção de embutir e na matriz de estirar (tipo 2);
- **Ruptura no fundo**: o fundo rompido é unido ao resto da peça apenas por um lado; a relação de embutimento é grande demais para a chapa empregada / introduzir mais uma etapa de embutimento, realizando a operação em mais passes, ou escolher uma etapa de maior capacidade de embutimento (tipo 2);
- **Trincas no fundo depois de se ter conseguido quase todo o corpo**: (ocorre pouco em peças redondas e mais frequentemente em peças irregulares)

variação de espessura na chapa ou folga de embutimento entre o punção e a matriz muito estreita (em peças retangulares, estreitamento da folga de embutimento devido à formação de uma pasta de óxidos) / revisar a espessura da chapa, eventualmente alargar o orifício de embutimento e, em peças de formato retangular, limpar sempre as arestas da ferramenta (tipo 2);

- **Forma abaulada** (corpo arqueado para fora, juntamente com o arqueamento do canto superior do recipiente): folga de embutimento demasiadamente larga / algumas vezes o problema é eliminado com o aumento da pressão de sujeição; deve-se trocar a matriz ou o punção (tipo 2);
- **Estrias de embutimento**: desgaste da ferramenta e chapa oxidada / tratamento superficial para endurecimento das arestas da matriz, melhorar o processo de decapagem, melhorar as condições de lubrificação, empregar eventualmente películas de embutir (tipo 3);
- **Relevos unilaterais nas rupturas de fundo (por dentro)**: posição excêntrica do punção com relação à matriz de embutimento / soltar a sujeição da ferramenta e centrar a matriz corretamente com relação ao punção (tipo 3);
- **Formação de pregas na aba**: pressão de sujeição insuficiente / aumentar a pressão do sujeitador (tipo 3);
- **Pregas e trincas na aba**: folga de embutimento muito larga ou arredondamento muito grande das arestas de embutimento / trocar a matriz do embutimento (tipo 3);
- **Ampolas no fundo e as vezes também abaulamento no fundo**: má aeração / melhorar a saída do ar (com frequência é melhorado se a distribuição do lubrificante for mais uniforme) (tipo 3).

No projeto da ferramenta, Faria (2019) afirma que, além de considerar os esforços de conformação, deve-se determinar os esforços aplicados pelo prensa-chapas, caso este aplique uma tensão excessiva, pode ocorrer a ruptura da peça na conformação e, se for muito pequena, podem surgir rugas nas laterais das peças.

A tensão de compressão aplicada pelo prensa-chapas deve ser suficiente para permitir o movimento da aba do disco em direção à região central e evitar o

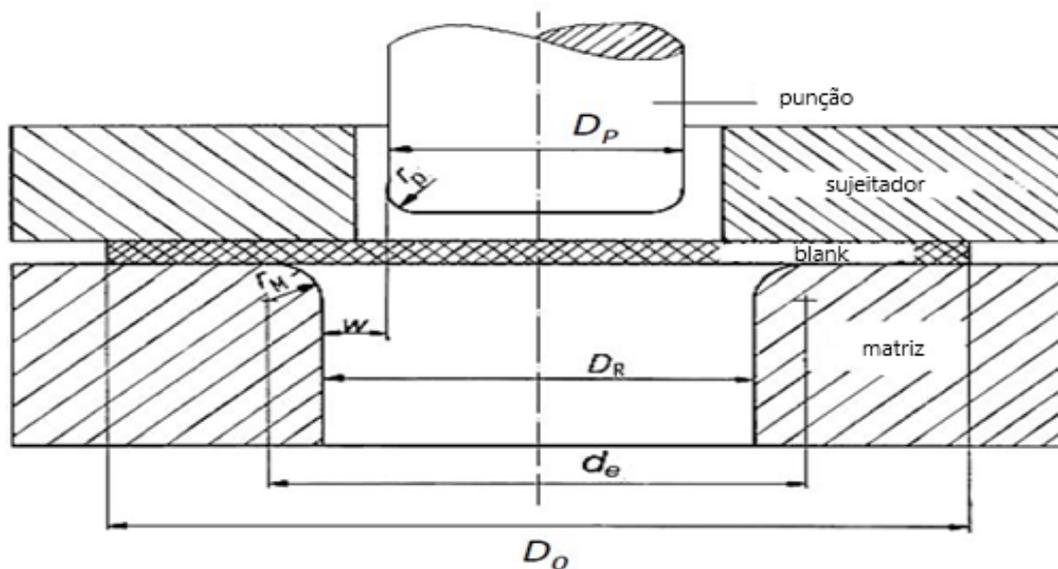
aparecimento das rugas conforme indicado na Figura 13. Ainda na aba atuam os esforços de tração, que trazem essa parte para a região central, denominadas tensões de estiramento radial, e os esforços de atrito que dependem do nível da tensão de sujeição, dos estados das superfícies (da chapa, da matriz e do sujeitador quanto á rugosidade superficial) e do tipo de lubrificante empregado (FILHO,1997).

Figura 13- Principais defeitos presentes na estampagem profunda



Fonte: Faria et al (2019, p.69).

Figura 14- Demonstração do sujeitador com parâmetros otimizados de uso para minimizar enrugamento de chapas



Fonte: Faria et al (2019, p.31)

Abaixo seguem as definições de cada variável e termos descritos na Figura 14.

D_0	Disco inicial a ser estampado;
d_e	Soma entre o diâmetro da matriz D_R e $2r_m$ ou conforme descrito na figura
D_R	Diâmetro da matriz
r_m	Raio de entrada da matriz;
D_p	Diâmetro do punção;
t	Espessura do blank a ser estampado;
w	Diferença entre o raio da matriz e o raio do punção;
r_p	Raio da extremidade do punção;

O disco inicial sofre um estiramento, e esse fato pode ser demonstrado verificando-se que uma dada linha traçada, segundo um diâmetro do disco inicial, apresentará um comprimento maior quando medida ao longo da seção do copo após a conformação. A deformação plástica ocorrida, entretanto, não é devida somente à ação do estiramento, mas também decorrente da extrusão causada pela compressão do sujeitador e pela compressão circunferencial.

A ação da tensão circunferencial tende a aumentar a espessura da chapa nessa região, mas isso ocorre apenas em pequena intensidade diante da ação restritiva da pressão do sujeitador.

Nas regiões de dobramento na matriz e no punção, agem tensões de tração na superfície externa e compressão na interna, a essas tensões se associam os esforços de atrito.

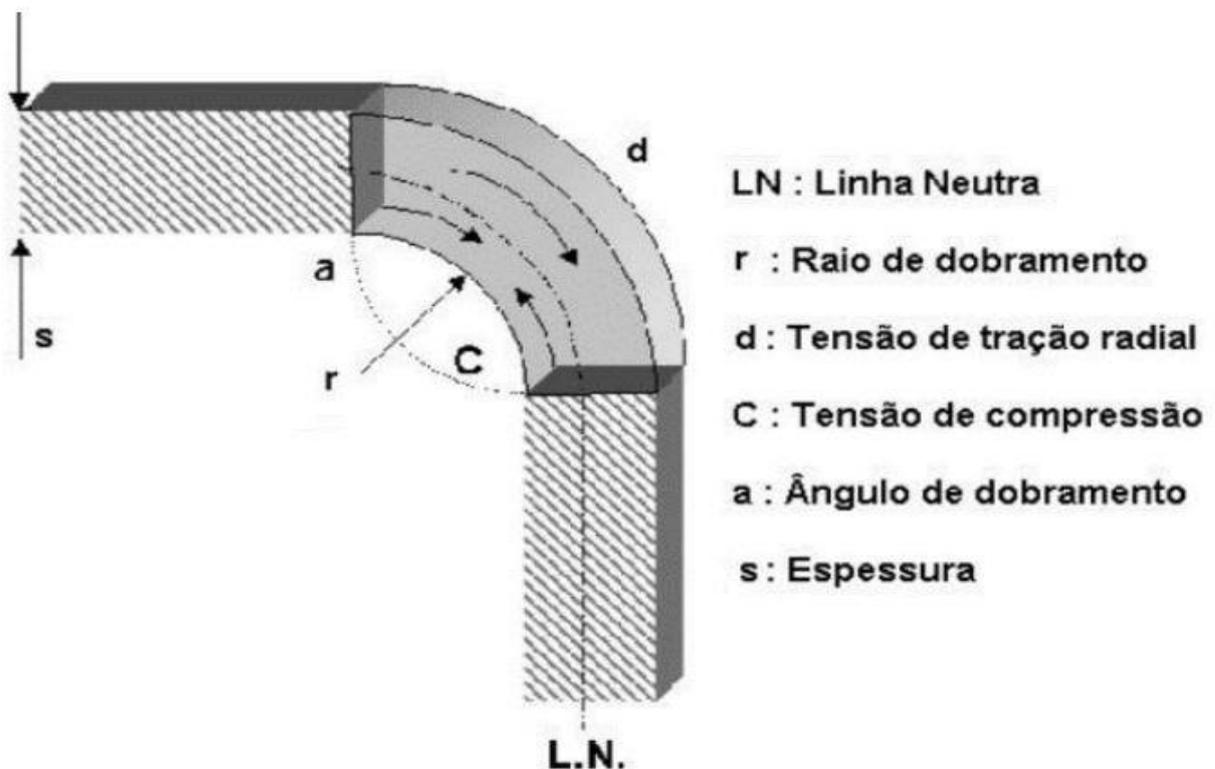
Nas laterais do copo atuam as tensões de tração, ao longo dessas laterais (que provocam o estiramento das paredes do copo) e tensões de compressão, perpendiculares à superfície das laterais (que provocam afinamento da espessura da parede). Agem ainda nessa região os esforços de atrito entre a superfície externa da lateral do copo e a superfície da cavidade da ferramenta e entre a superfície interna da lateral do copo e a superfície lateral do punção.

A existência desses esforços de compressão, e conseqüentemente de atrito, depende da folga existente entre as dimensões da cavidade da matriz e do punção. Se a folga existente for maior que a espessura da chapa na lateral do copo que penetra na cavidade da matriz, então não ocorrerá o efeito de afinamento e de atrito (HOSFORD ; CADDELL, 2011).

No fundo do copo, o esforço predominante é a tensão de compressão exercida pela extremidade do punção, que é transmitida às demais parte de copo através das tensões de tração radial.

A maior parte dos esforços de atrito se origina entre o seu sujeitador e a aba, e entre esta e a superfície superior da matriz. O esforço total exercido pelo punção, ou seja, o esforço de estampagem, é igual à soma dos esforços atuantes em todas as partes do copo conforme Figura 15, acima. Se o esforço de estampagem provocar em qualquer parte do copo uma tensão superior ao limite de resistência do material da chapa, ocorrerá a fissura desta parte.

Figura 15- Esforços atuantes e linha neutra no dobramento

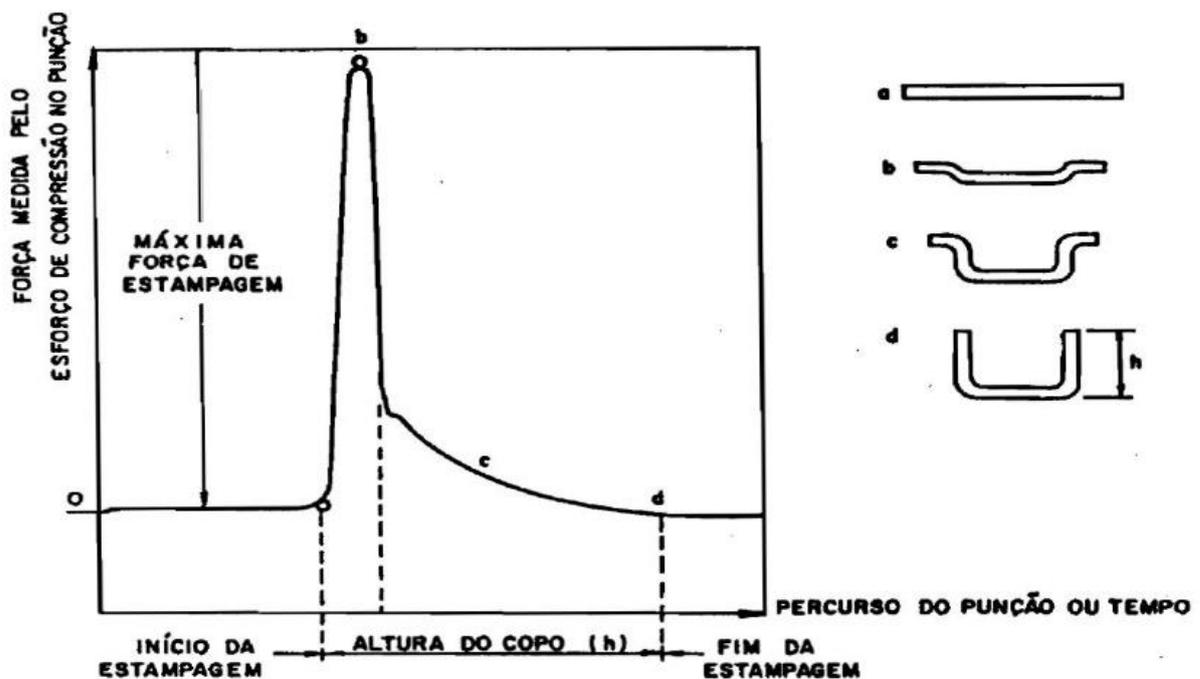


Fonte: Pereira (2005, p.7).

Conforme demonstrado na Figura 16 a curva traçada em que a ordenada representa a força de estampagem exercida pelo punção e a abscissa o percurso do punção-, que a máxima força ocorre logo no início da operação de estampagem para, logo a seguir, assim que o punção começa a penetrar na matriz, cair visivelmente de intensidade. Portanto, a condição de tensão máxima ocorre no início do processo de conformação, e aí devem surgir os efeitos de enrugamento da aba ou fissuramento da lateral em formação, que dificilmente ocorrem nos estágios finais da operação.

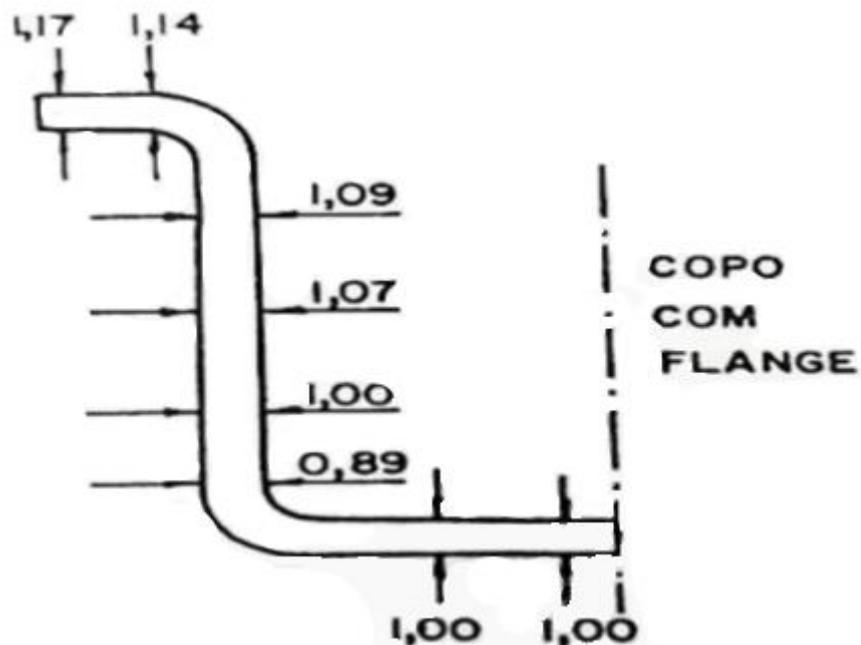
Em decorrência dos diversos estados de tensão nas diversas partes do copo, ao longo da operação de estampagem, as paredes do copo deformado, com ou sem flange, apresentam-se com espessuras diferentes conforme demonstrado na Figura 17. Nota-se que geralmente o fundo mantém a espessura do disco inicial, e as laterais apresentam-se mais espessas na borda e, na parte inferior, junto à dobra de concordância do fundo, menos espessa. Na borda superior existe a maior tensão de compressão e na parte inferior da lateral a maior tensão de tração (FILHO,1997).

Figura 16- Esforços de estampagem medidos no punção



Fonte: Filho (1997).

Figura 17 Variação da espessura em mm das paredes do copo



Fonte: Faria et al (2019, p.20).

A intensidade do esforço mecânico necessário à estampagem de um material depende essencialmente das condições de atrito entre a chapa e a matriz, entre o punção e o prensa-chapas, além e da intensidade da pressão do prensa-chapas. Outros fatores devem ser considerados, pois serão utilizados para a redução da severidade de conformação de uma peça por estampagem, da seguinte forma: maiores raios da matriz e do punção nas regiões de dobramento (principalmente da matriz), adoção de inclinação na superfície superior da matriz e do punção, utilização de uma cavidade cônica da matriz antes da cavidade cilíndrica e aplicação de diversos estágios de operação de conformação (como na tradicional fabricação de um cartucho).

Nos casos de fabricação de peças com formatos irregulares, pode-se restringir a deformação de um dos lados, ou de todos, se for o caso, aumentando o atrito entre a chapa e a superfície da matriz através da usinagem de uma superfície rugosa na matriz (HOSFORD ; CADDELL, 2011).

3.3 Ensaios simulativos

Erichsen foi pioneiro em realizar testes para avaliar a estampabilidade de chapas metálicas. O ensaio proposto por ele consistia em esticar um corpo de prova em folha por meio de uma punção até a ocorrência da fratura. A profundidade do recuo do punção na amostra expressa em milímetros é o chamado índice de Erichsen (IE). Este é o parâmetro mais comumente usado para expressar a conformabilidade de chapas metálicas (ERICHSEN, 1914).

Ao longo dos anos seguintes, vários pesquisadores analisaram a precisão, os limites de aplicabilidade, bem como os fatores que influenciam os resultados do teste proposto por ele. (PEARCE,1982; NARASHIMHAN, 1996; KAFTANOGLU,1961; KAYSELER,1934; KOKKONEN,1959; YOKAY,1967). Olsen (1920) introduziu um teste semelhante ao proposto por Erichsen, mas com um tamanho diferente das ferramentas.

Como o índice estabelecido por meio desses métodos tinha baixa precisão devido ao limite quanto ao tamanho das ferramentas e a impossibilidade de garantir uma boa fixação da amostra e má lubrificação, Hecker (1974) com o intuito de minimizar esses erros propôs um teste de conformabilidade baseado no estiramento de um punção com diâmetro maior do que o de Erichsen e Olsen testes. Neste caso, a peça bruta também é presa por cordões de estiramento, onde há um atrito seco entre o punção e corpo de prova. Como para o teste de Erichsen e Olsen, o índice de conformabilidade é expresso pela profundidade do recuo do punção no início de fratura.

Como a maioria dos defeitos na estampagem profunda de peças complexas está localizada perto do região no alongamento plano (deformação plana), Ghosh (1975) propôs uma modificação do Teste de Hecker para simular este estado de deformação. Para isso ele usou Dispositivo de Hecker com amostras de tiras de várias larguras. Este teste, chamado de limite o teste de altura da cúpula (LDH).

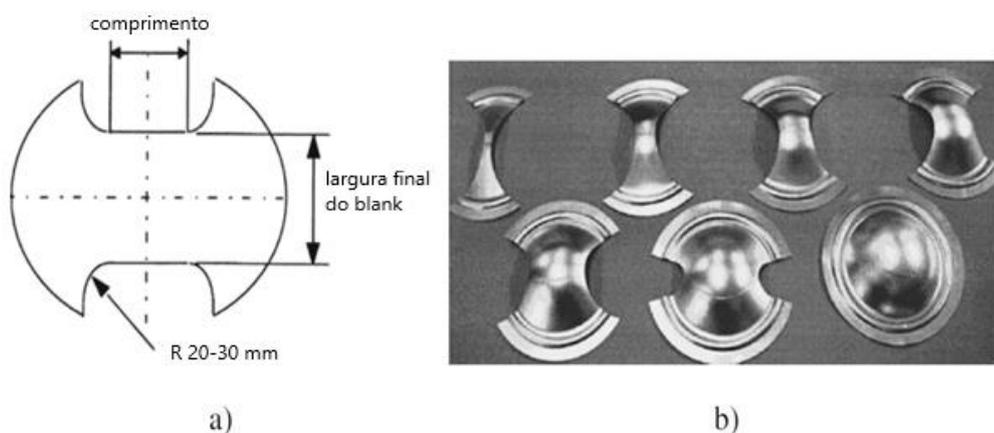
Por fim, Jovignot (1930) propôs um método de teste baseado no teste de protuberância hidráulica. Siebel e Pomp (1929) desenvolveu um teste que consiste em estampar profundamente uma amostra circular com furo circular central até a ocorrência da fratura. O índice de conformabilidade é expresso como o diâmetro do furo no início da fratura.

Além do ensaio simulativo Swift, que foi utilizado para a determinação do LDR do material estudado, conforme mencionado anteriormente, seguem alguns dos principais ensaios simulativo utilizados na atualidade.

3.3.1 Ensaio Nakazima

O teste Nakazima consiste em desenhar amostras retangulares com larguras diferentes usando um punção hemisférico e uma matriz circular. Variando a largura da amostra e o lubrificante pode-se obter tanto o domínio positivo quanto o negativo de uma curva limite de conformação, CLC. A forma da amostra recomendada pela norma ISO 12004 é apresentada na Figura 18. O comprimento recomendado é maior que 25% do diâmetro do punção. Para o diâmetro do punção e o diâmetro da matriz são recomendados os valores 100 e 105 mm, respectivamente (BANABIC,2010).

Figura 18- Amostra padrão conforme norma ISO 12004

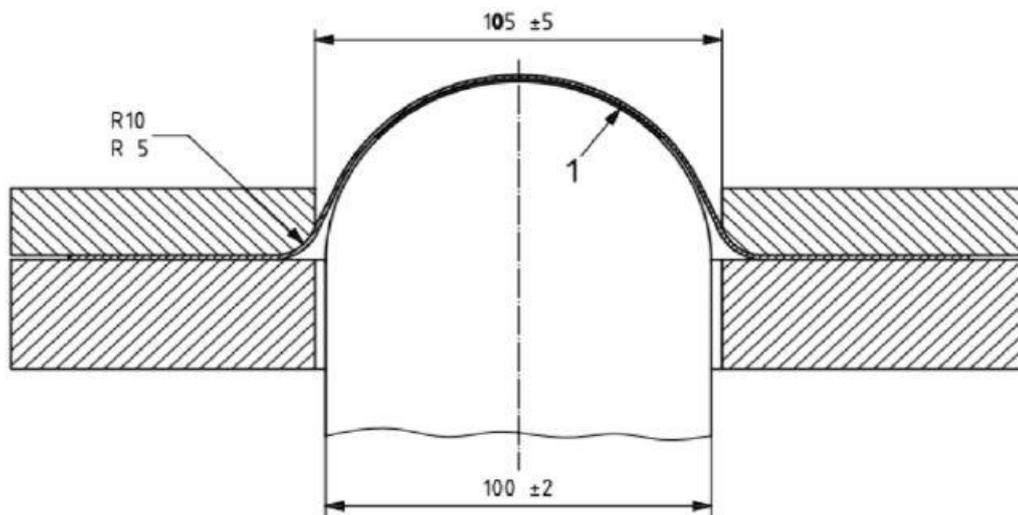


(a) formato do corpo de prova usado no ensaio Nakazima; (b) Conjunto de espécimes para uma CLC completa

Fonte: Banabic (2010).

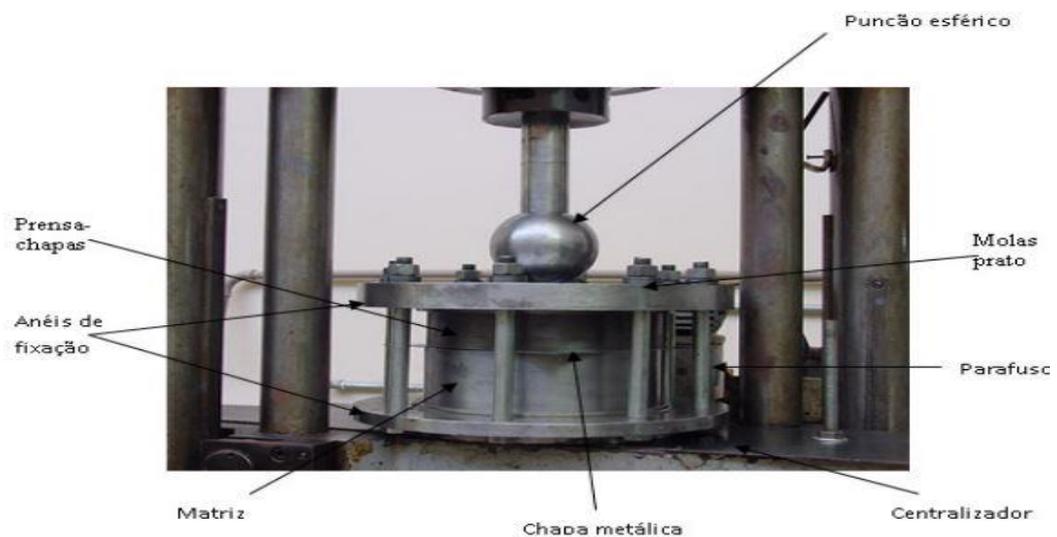
As vantagens do teste são a simplicidade das ferramentas conforme as Figuras 19 e 20, a forma simples das amostras e a possibilidade de abranger todo o domínio das curvas CLC também chamadas de FLD (*Forming Limit Diagram*, diagrama limite de conformação). Desvantagens são a possibilidade de enrugamento e erros de medição causados pela curvatura do punção. Este método é usado como procedimento padrão pela norma ISO 12004 para materiais metálicos, determinação das curvas limite de deformação (BANABIC,2010).

Figura 19- Representação da matriz usada para o ensaio nakazima.



Fonte: Faria et al (2019, p.80).

Figura 20- Representação ferramental do ensaio Nakazima.



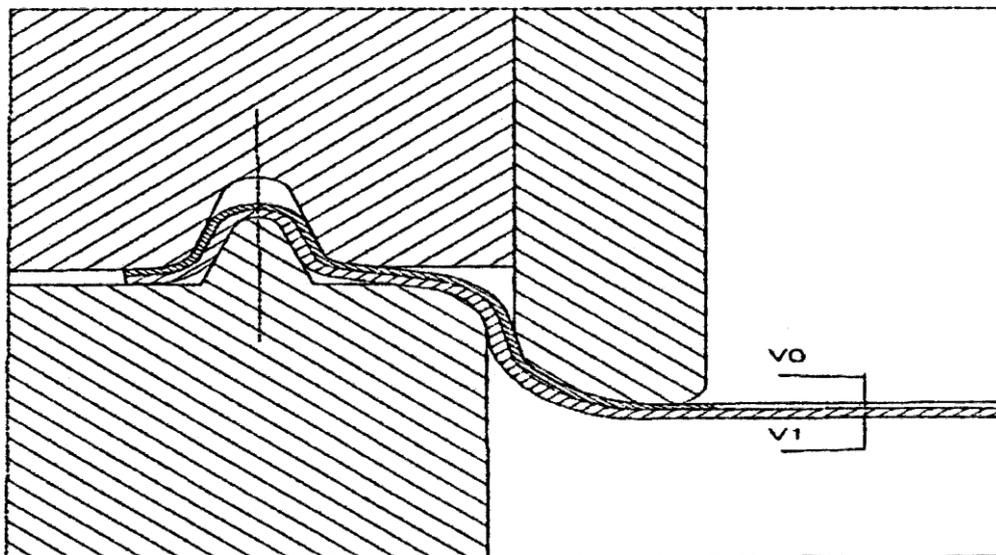
Fonte: Lobão (2003).

3.3.2 Ensaio Marciniak

De acordo com Lundgren (2009), o ensaio proposto por Marciniak difere do ensaio Nakazima principalmente devido à conformação de um corpo de prova com a presença de um espaçador posicionado na superfície. Esse espaçador impede que ocorra o contato direto entre o punção e a chapa, eliminando desta forma o efeito do atrito. Outra diferença refere-se ao formato das chapas que passam a ser circulares com entalhes circulares de raios variados. O punção neste ensaio tem um formato de copo cilíndrico, cujo ferramental é mostrado esquematicamente na Figura 21 (GRONOSTAJSKI ; DOLNY, 1980).

A fim de obter diferentes caminhos de deformação durante a realização de um ensaio do tipo Marciniak, que consiste na combinação de diferentes esforços mecânicos, usando por exemplo punções com diferentes geometrias, foram realizados testes onde os modos de deformação são simulados, variando-se, por exemplo, a largura dos corpos de prova é possível obter o modo de estiramento equibiaxial à medida que se aumenta a largura dos corpos de prova, conforme mostrado na Figura 22 para o ensaio Nakazima, (LOPES, 2006).

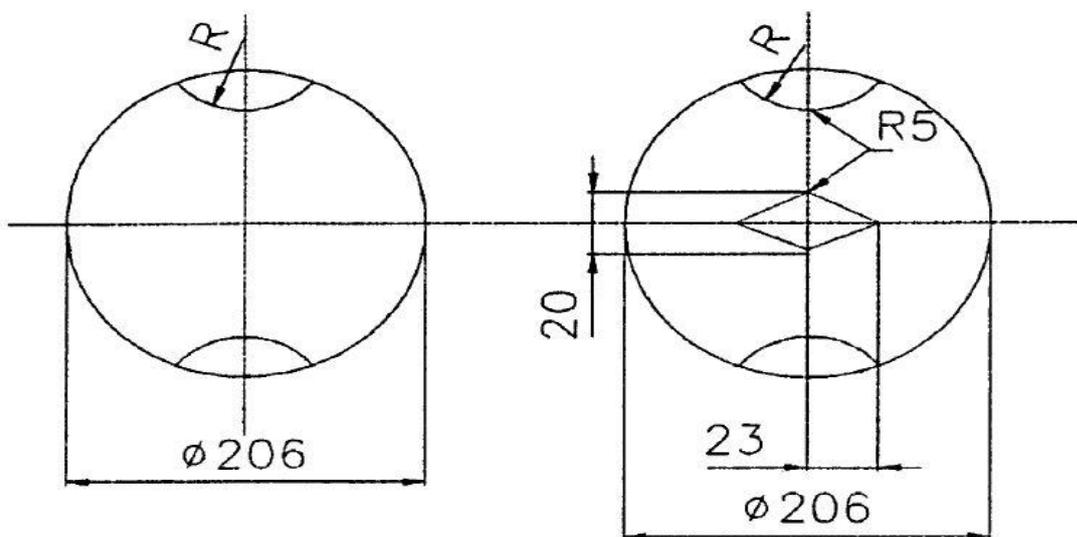
Figura 21- Representação esquemática da matriz usada para o ensaio Marciniak [ISO/WD 12004].



Fonte: Banabic (2010).

Para obter diferentes caminhos de deformação são utilizados punções com diferentes seções transversais (elíptico, circular, retangular) conforme demonstrado na Figura 22. A vantagem deste teste é que o rasgo aparece na parte inferior plana da peça, eliminando assim os erros de medição causados por uma curvatura.

Figura 22- Formas dos espécimes e da parte intermediária utilizadas no ensaio proposto por Marciniak



Fonte: Banabic (2010).

As desvantagens são as formas mais complexas de punção e matriz e a limitação do teste para o domínio positivo do diagrama de limite de deformação (BANABIC,2010).

3.4 Avaliação de deformações e obtenção de curva limite de conformação

De acordo com Moreira *et al* (2003), para avaliar se uma peça pode ser fabricada usando um determinado processo ou para avaliar a possibilidade de ocorrências de falhas em peças são largamente usados os diagramas limite de deformação compostos por um gráfico que expõe os valores da deformação real maior (ϵ_1) em função da deformação real menor (ϵ_2). Estes diagramas contêm curvas que mostram se a chapa pode sustentar uma determinada deformação durante um processo de fabricação sem romper.

Com base em medidas experimentais, o conceito da Diagrama Limite de Conformação (DLC) foi inicialmente introduzido por Keeler (1965) para os valores positivos da menor deformação principal no plano da chapa. Este conceito foi então estendido por Goodwin (1968) e Woodthorpe *et al* (1969) ao domínio de deformações compreendido entre os estados de tração uniaxial e estiramento biaxial. Desde então, inúmeras pesquisas foram dedicadas à determinação experimental e ao modelamento teórico das deformações limite em chapas (CHEMIN, 2004).

A curva estabelecida através de trajetórias lineares de deformação permanece constante durante o processo de deformação, sendo conhecida como Curva Limite de Conformação (CLC).

De acordo com Richter (2003), a curva limite de conformação é uma representação do comportamento de uma chapa metálica que é deformada em um processo de conformação mecânica e traçada em um diagrama (deformação verdadeira maior em função da deformação verdadeira menor).

A partir das relações entre as deformações maior e menor, podem ser obtidas relações entre as mesmas que definirão o modo de deformação plástica detectado durante a etapa de deformação plástica da chapa:

$\epsilon_1 = -\epsilon_2$ Embutimento profundo;

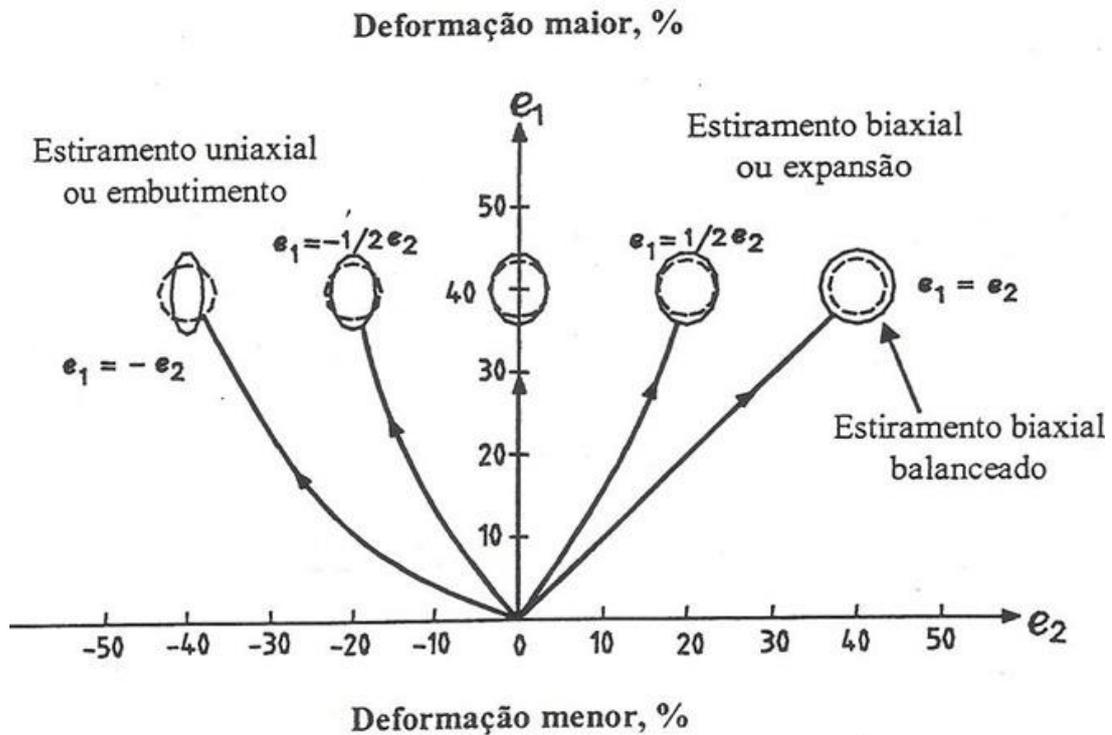
$\epsilon_1 = -2\epsilon_2$ Tração uniaxial;

$\epsilon_2 = 0$ Estado plano de deformação;

$\epsilon_1 = \epsilon_2$ Estiramento;

Lange (1993) fez uma representação do Diagrama Limite de Conformação, mostrando o tipo de deformação sofrido pelo material para uma malha circular impressa na chapa, tanto no estiramento quanto no embutimento profundo. Este diagrama está apresentado na Figura 23.

Figura 23- Deformações no embutimento profundo e no estiramento para uma malha circular



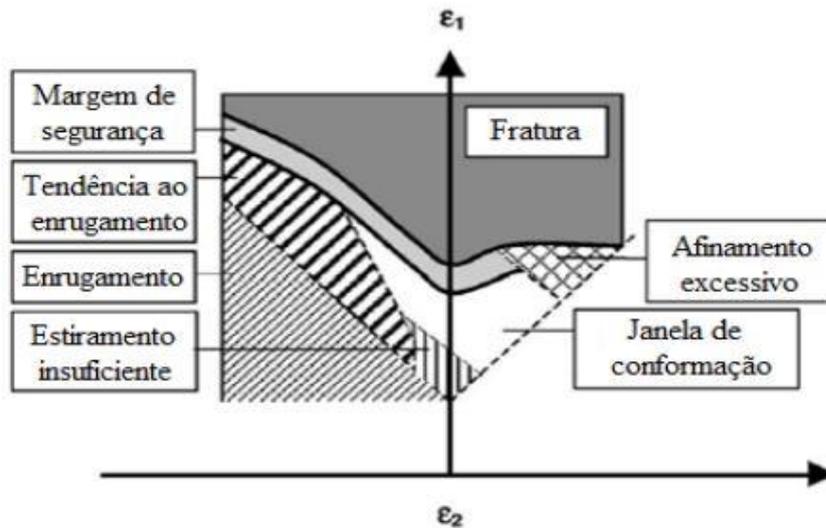
Fonte: Lundgren (2009).

Segundo Moreira *et al* (2003), existem na literatura muitos ensaios experimentais destinados à determinação da CLC, como os testes uniaxiais (tração) e os testes propostos por Swift, Fukui e Erichsen, que possibilitam o levantamento da CLC. Atualmente, no entanto, a CLC é geralmente determinada com o auxílio de um ferramental simples empregando corpos de prova de diferentes larguras, que vem sendo adotado nos ensaios propostos por Nakazima, (1968) e Marciniak, (1967), nos quais a chapa é bloqueada em sua periferia e deformada por um punção hemisférico (Nakazima) ou de fundo plano (Marciniak).

Uma CLC, portanto, é um diagrama empiricamente construído, largamente utilizado para descrever o lugar geométrico das deformações principais e críticas, que ocorrem na superfície da chapa, para as quais a estricção localizada se torna visível ou ocorre a fratura. As CLC's são empregadas para avaliar o limite das deformações de um determinado material quando submetido aos diversos modos de deformação inerentes aos processos de conformação (LUNDGREN, 2009).

Para obter os dados que são necessários para a construção da curva limite de conformação (CLC), conforme Figura 24, é necessário mensurar o valor das deformações dos corpos de prova em que foram aplicadas grades na superfície da chapa.

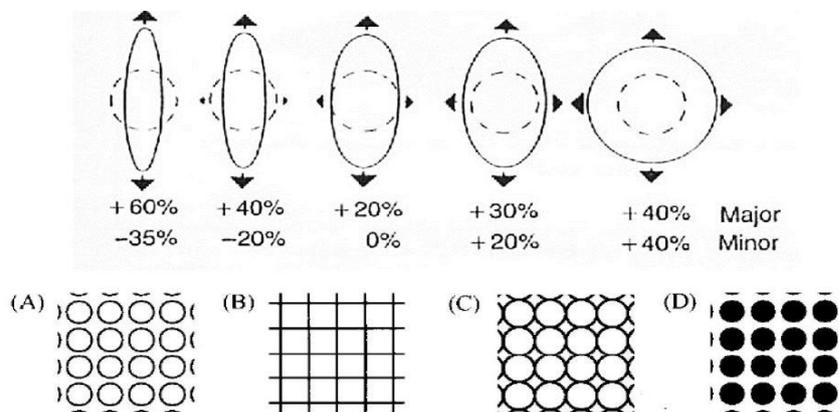
Figura 24- CLC e a janela de conformação proposta por (Holmberg et al, 2003; Marciniak, 2002)



Fonte: Lundgren (2009).

Antes do processo de conformação, tem-se a marcação da malha circular na superfície dos blanks conforme Figura 25.

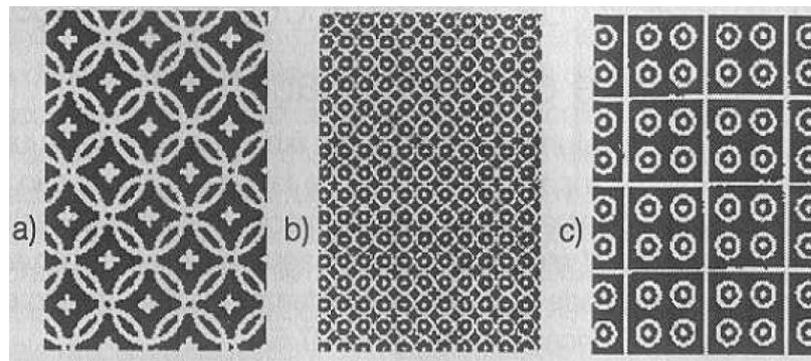
Figura 25- Grade com círculos inicial para ensaio com indicação da maior e menor valor das deformações.



Fonte: Faria et al (2019, p.84).

Neste caso, são usados diferentes tipos de grades que consistem em formas geométricas simples, como círculos e quadrados conforme Figura 26, (SCHAEFFER,2004).

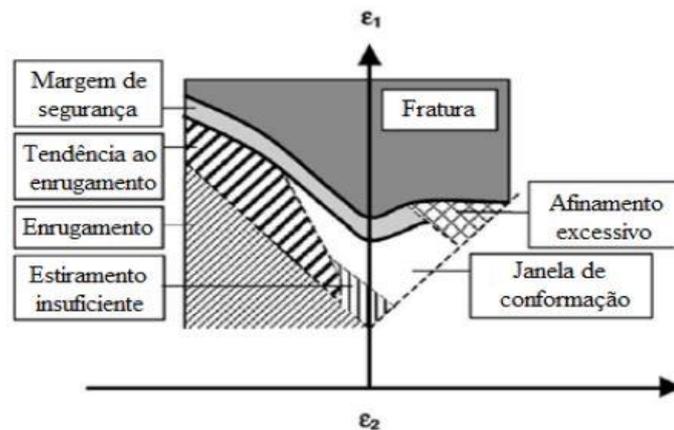
Figura 26- Três diferentes formas de grades que são usadas para a avaliação de deformações de chapas em processo de conformação mecânica.



Fonte: Schaeffer (2004).

Para aplicar essas grades em cima da superfície da chapa podem ser usados diferentes processos. O método mais usado é um processo eletroquímico, pois as grades produzidas com uso desse método têm melhor resistência contra o atrito que ocorre durante o processo de conformação entre a superfície da chapa e da ferramenta.

Figura 27- CLC e a janela de conformação proposta por (Holmberg et al, 2003; Marciniak, 2002)



Fonte: Lundgren (2009).

No exemplo de uma curva limite de conformação exibido na Figura 27 é possível perceber pela relação entre as deformações a presença de modos diferentes de solicitação mecânica aplicados a um material, ou seja, um caminho ou trajetória de deformação.

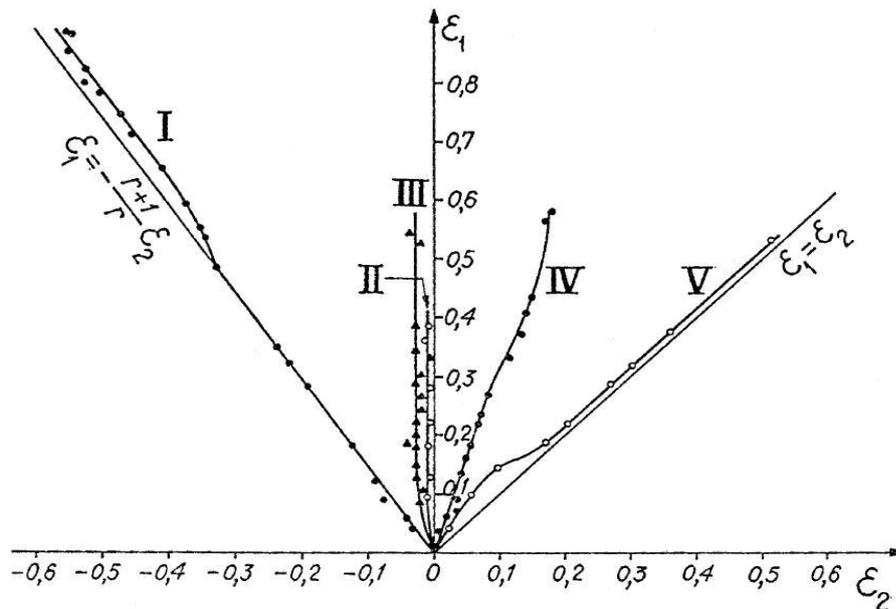
Algumas técnicas experimentais podem ser usadas para alcançar diferentes trajetórias de deformação, como exemplo:

- I – trajetória de deformação com uso de um ensaio de tração com amostra padrão;
- II – trajetória de deformação usando uma amostra de parede fina ensaiada a tração;
- III – trajetória de deformação advinda de um ensaio do tipo Swift;
- IV – trajetória de deformação decorrente do ensaio Jovignot com expansão hidráulica mediante uso de uma matriz circular (BANABIC,2010).

Kikuma (1971) mostrou a influência do caminho de deformação em uma DLC conforme Figura 28. Para processos de deformação de chapas de aço usados pela indústria automotiva, autores japoneses Kikuma (1971) e Yoshida (1959), têm mostrado que, desde que o padrão de deformação mude de uma passagem para outra, a trajetória de deformação é uma linha intermitente. Se um esforço de tração é seguido por um compressivo, os limites de deformação são menores que os

correspondentes previstos por uma CLC, por outro lado, uma carga compressiva precedendo uma tração melhora os valores de deformação limite.

Figura 28 - Caminhos de deformação usados em diferentes testes

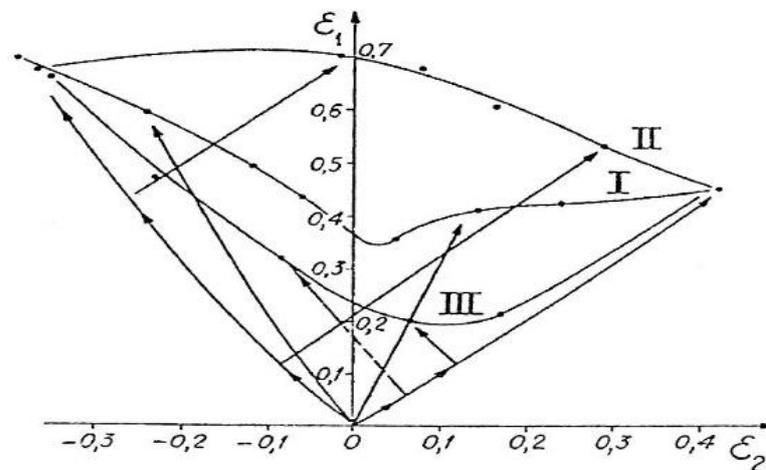


Fonte: Banabic (2010).

As trajetórias de deformação durante a operação de estampagem geram uma deformação que pode ser simulada em testes de laboratório, aplicando-se ao mesmo material trajetórias de deformação diferentes e sucessivas, por exemplo, tração seguida pelo retrocesso de um punção ou uma expansão biaxial acompanhada por tração (KIKUMA, 1971).

Uma mudança na trajetória de deformação afeta o limite de deformação conforme as rotas I e II exibidas na Figura 29, mediante aplicação de esforços de compressão e tração acompanhados por expansão biaxial, ou seja, quando a deformação menor é menor que zero, $\epsilon_2 < 0$. Contudo, quando o valor da deformação menor é maior que zero, $\epsilon_2 > 0$ acompanhada por uma carga de compressão ou tração, tem um decaimento nas deformações do material que pode ser justificado com um aumento de dureza fornecido pelo encruamento do material na trajetória citada na curva limite III (BANABIC, 2010).

Figura 29- Influência do caminho de deformação na curva limite de deformação



Fonte: Banabic (2010).

Desta forma, a conformabilidade residual depende da evolução da deformação. É sabido que os defeitos induzidos pela deformação plástica são uma consequência do desenvolvimento de vazios na interface da matriz/inclusão, seu crescimento e coalescência também dependem do histórico de tensão (BANABIC,2010).

Alguns tipos de esforços (tração, compressão, torção e flexão) são condicionados a um material para que ocorra o processo de deformação plástica, se esses esforços são aplicados de forma alternada durante a conformação do material, pode-se dizer que foi alterada sua trajetória de deformação. Em decorrência dessa variação das formas com que o esforço pode ser aplicado, o material será submetido a alterações nas características do seu processo de encruamento, sendo que, esta grandeza é de fundamental importância para avaliar os aspectos da conformação do material e mudanças no seu comportamento quando experimenta diferentes trajetórias de deformação.

De acordo com Rauch (1992), durante uma mudança na trajetória de deformação podem ocorrer mudanças no encruamento de um material, afetando aspectos como ductilidade, seja atrasando o início da instabilidade plástica do material ou até mesmo uma limitação do alongamento uniforme, constituindo assim um fator limitante para a conformação de um material. Destaca-se que o comportamento exibido por um

material quando se altera a trajetória de deformação depende principalmente do material empregado e à forma pela qual a trajetória de deformação foi alterada, ou seja, qual o tipo de carregamento a que o mesmo foi submetido.

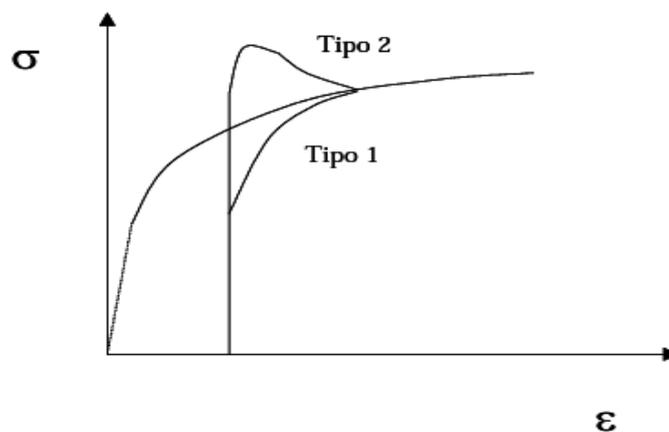
Segundo Chung e Wagoner (1986) alguns efeitos transientes podem ser observados na curva tensão-deformação de um material quando ocorre a mudança na trajetória de deformação do mesmo, sendo eles:

Tipo 1: Ocorrência de uma tensão de fluxo inicial menor, acompanhada por um aumento de encruamento;

Tipo 2: Ocorrência de uma tensão de fluxo inicial maior, acompanhada por um menor encruamento;

A Figura 30 abaixo ilustra essas trajetórias de forma a relacionar o fenômeno acima com o gráfico de tensão-deformação. Para os dois tipos de efeitos provenientes da alteração da trajetória de deformação citados acima, Chung e Wagoner (1986, afirmam que, para o tipo 1, típico em materiais sujeitos a testes com inversão do sentido da deformação, denominados testes Bauschinger, a deformação uniforme tende a aumentar, ao passo que, para o tipo 2, há a ocorrência de uma estricção precoce e posteriormente a ruptura do material.

Figura 30- Esquema representativo dos dois tipos de comportamento mecânico mediante alteração na trajetória de deformação



Fonte: Chung e Wagoner (1986).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material

O material utilizado neste trabalho foi o aço inoxidável ferrítico AISI 441 com espessura de 1,0 mm (estado como recebido da usina), o qual foi usado para a realização dos ensaios de caracterização mecânica (tração, cisalhamento e microdureza Vickers), laminação a frio e para a operação de estampagem para permitir o cálculo do LDR e da curva CLC.

As chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 441 possuem tamanho de grão médio de $57,8 \pm 16,0 \mu\text{m}$ para o estado como recebido e de $55,1 \pm 15,8 \mu\text{m}$ para a condição laminado a frio, ou seja, sem mudança significativa entre esses estados conforme medições realizadas pela empresa Vallourec VSB.

A análise da composição química (percentual em peso, %) do aço AISI 441 foi realizada por meio da técnica de Espectroscopia por Emissão Óptica (EEO) com utilização do espectrômetro *Spectrolab* da *AMETEK Materials Analysis Division*, Tabela 1.

Tabela 1- composição química aço inoxidável ferrítico AISI 441

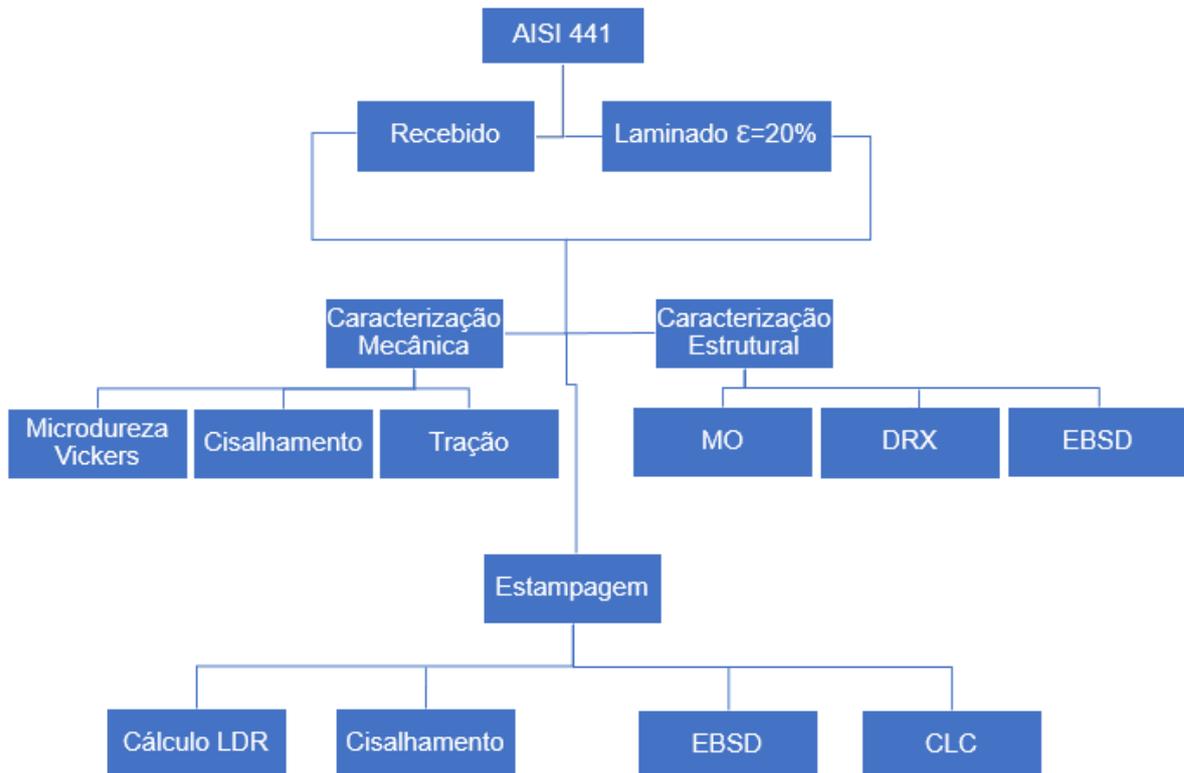
% de elementos químicos					
%C	%Mn	%Cr	%Nb	%Mo	%S
0,0140	0,1580	18,0100	0,5600	0,0196	0,0003

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.2 Fluxograma

O resumo dos procedimentos experimentais adotados nesta pesquisa está detalhado na Figura 31.

Figura 31- Fluxograma dos procedimentos experimentais



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3 Laminação a frio

A laminação a frio foi realizada nas chapas do aço inoxidável AISI 441 com o objetivo de promover mudança no estado inicial deste material, quando comparado com o estado como recebido, ou seja, aumentando o endurecimento por encruamento do material. Neste caso, a laminação foi realizada em um laminador Fröhling com o uso de cilindros de laminação com 250mm de diâmetro e velocidade tangencial de 10m/min, sendo a magnitude de deformação efetiva calculada de acordo com o critério de von Mises, conforme Equação (10), sendo adotado o valor de 0,20 (20%):

$$\varepsilon_{\text{laminação}} = 1,15 * \ln \left(\frac{t_0}{t_f} \right) \quad (10)$$

sendo:

t_0 = espessura inicial (mm);

t_f = espessura final (mm).

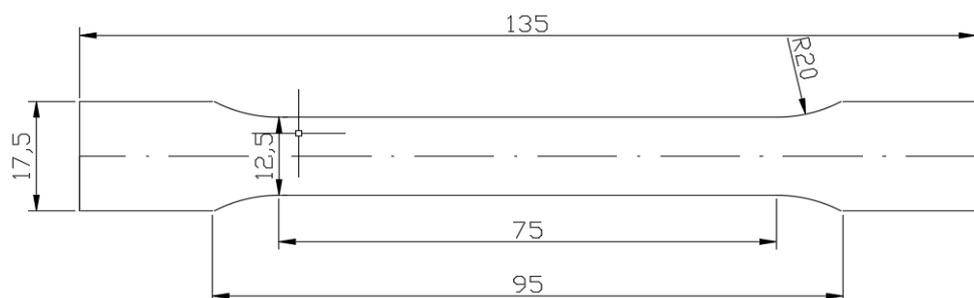
4.4 Caracterização Mecânica

4.4.1 Ensaio de tração

Ensaio de tração no aço inoxidável AISI 441 foram realizados em uma máquina universal de ensaios Instron 5982 com sistema de aquisição de dados *BlueHill 3*, extensômetro mecânico do tipo agulhas com 25mm de abertura, sendo adotada taxa de deformação inicial de 0,001/s em corpos de prova, conforme Figura 32, confeccionados por meio de corte por jato d'água, conforme a norma ASTM E-8M (2009).

Os ensaios de tração foram realizados em corpos de prova nos estados como recebido e laminado. Neste caso, foram calculados os seguintes parâmetros de resistência mecânica: limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LRT), razão LRT/LE e de ductilidade, o alongamento uniforme (AU).

Figura 32 Amostra para ensaio de tração conforme norma ASTM E-8M 2009



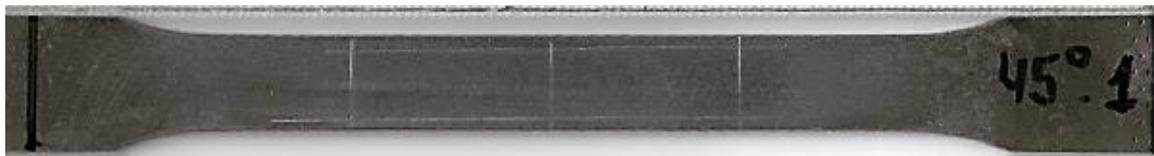
Fonte: Elaborado pelo autor de acordo com a Norma ASTM E-8M (2009).

Ensaio de tração também foram realizados para a medição da anisotropia do aço AISI 441 nos estados como recebido e laminado por meio da deformação convencional de 15% em amostras retiradas a 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação, DL, de acordo com a norma ASTM E 517.

Neste caso, foram fabricados nove (09) corpos de prova de tração, sendo três (03) para cada uma das condições, sendo a medição das deformações sofridas pelo aço AISI 441, ao longo da largura e do comprimento, realizadas a partir da comparação das imagens dos corpos de prova de tração previamente marcados antes e após o ensaio de tração.

As marcações consistiram em três traços feitos com uso de uma ponteira, com espaçamento de 20 mm Figura 33, ao longo do comprimento útil dos corpos de prova, sendo a variação dos valores da largura do corpo de prova, w , e do comprimento, l , necessária ao cálculo dos fatores de anisotropia a 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação, conforme Equação (11) e em seguida, os valores do fator de anisotropia planar, Equação (12), e normal média, Equação (13).

Figura 33 - Corpo de prova de tração com marcação para medição da anisotropia plástica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

$$R = -\frac{(\varepsilon_w)}{(\varepsilon_w + \varepsilon_l)} \quad (11)$$

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (12)$$

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (13)$$

4.4.2 Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers (HV) foi realizado em um microdurômetro HMV Shimadzu modelo 2T, com penetrador Vickers, com carga de 0,2kgf (200gf) e tempo de aplicação de 15 segundos. Amostras nos estados como recebido e laminada foram preparadas previamente mediante o lixamento com uso de lixas com granulometria de 240, 320, 400 e 600 mesh e posterior polimento com pasta de diamante, de 9 μm e 3 μm com posterior ataque com reativo químico Vilella (5mL HCl, 2g ácido pícrico e 100mL de álcool etílico).

4.4.3 Ensaio de Cisalhamento

O ensaio de cisalhamento foi aplicado ao aço AISI 441 a partir do uso de um dispositivo (garra de cisalhamento) adaptado à máquina de ensaios universal Instron 5982, Figura 34, adotando o mesmo software e extensômetro usados no ensaio de tração. Neste caso, para todos os ensaios de cisalhamento foi padronizada velocidade de 2,84mm/min para o deslocamento do cabeçote da máquina de ensaios universais, correspondendo a um valor de taxa de deformação, $\dot{\epsilon}$, igual a 0,001/s, ou seja, o mesmo valor adotado nos ensaios de tração.

Figura 34 – Dispositivo para ensaio de cisalhamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os corpos de prova para ensaio de cisalhamento consistiram em chapas com formato retangular, com dimensões 50x5 mm, conforme previsto por Rauch (1992) e Barlat (2003), variando a dimensão do comprimento desde as amostras usadas para a caracterização mecânica do aço AISI 441 antes e após a estampagem.

Para permitir a comparação dos resultados obtidos a partir do ensaio de cisalhamento com aqueles obtidos com o ensaio de tração, fez-se uso da deformação e tensão efetiva, conforme definido por Rauch (1992) com uso das Equações (14) e (15), respectivamente:

$$\varepsilon_e = \gamma / 1,84 \quad (14)$$

$$\sigma_e = \tau \cdot 1,84 \quad (15)$$

Sendo γ e τ a deformação e tensão cisalhantes, respectivamente, obtidas a partir do ensaio de cisalhamento, LOPES (2006).

O ensaio de cisalhamento também foi realizado nos copos embutidos do aço AISI 441 nos estados como recebido e laminado em duas regiões: no fundo e na lateral desses copos, sendo isso feito no último valor do diâmetro de blank que não provocou a ruptura dos copos, no caso, de 110 mm para o estado como recebido e de 105 mm na condição laminado, Figura 35.

Figura 35 – Copos embutidos e indicação dos copos de prova de cisalhamento



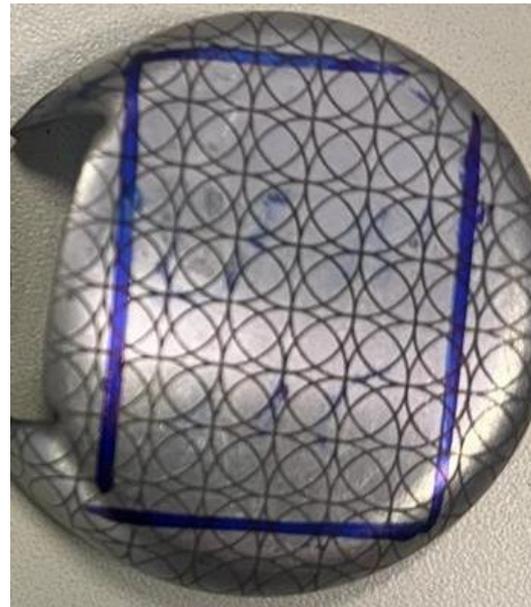
(a)



(b)



(c)



(d)

- (a) Copo AISI 441 como recebido, diâmetro blank de 110mm;
- (b) Copo AISI 441 laminado, diâmetro blank de 105mm;
- (c) Corpo de prova de cisalhamento retirado da lateral copo embutido;
- (d) Demarcação do corpo de prova de cisalhamento retirado do fundo do copo embutido.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.5 Caracterização Estrutural

4.5.1 Microscopia óptica

A caracterização micrográfica do aço AISI 441 foi realizada por meio de amostras quadradas com lado de 10mm mediante embutimento a frio feito com acrílico autopolimerizável, lixamento para desbaste utilizando lixas com granulometria de 240, 320, 400 e 600 mesh e posterior polimento com uso de pasta de diamante, de 9 e 3 μ m. As imagens foram observadas em um microscópio óptico Fortel, modelo IM713, com sistema de digitalização Kontrol, sendo realizado o ataque com uso do reativo químico Vilella.

4.5.2 Difração de raios x

A difração de raios X foi realizada com o objetivo de confirmar a presença da fase ferrita no aço inoxidável AISI 441 em ambos os estados, servindo como guia à interpretação dos resultados da difração por elétrons retro espalhados, EBSD.

Os experimentos foram realizados em um difratômetro com alvo metálico de cobre da marca *Shimadzu* modelo XRD-7000, ângulo de varredura de 30° a 120° e o passo de 0,02°, adotando-se velocidade de varredura igual a 2°/min.

O padrão de difração adotado para identificação das fases do aço AISI 441 será o PCPDFWIN versão 2.2 do ICDD (*International Council for Diffraction Data*).

4.5.3 EBSD

Os ensaios de difração por elétrons retro espalhados, EBSD, foram realizados em um microscópio eletrônico de varredura MEV MIRA (FEG-EDS-EBSD) com sistema OIM de análise de dados. As análises foram executadas sob tensão de 30 kV, ampliação de 300 x, distância de trabalho de 14,9 mm, sendo feita a detecção de grãos vizinhos a partir da desorientação de grãos com ângulo de 5°, adotando área de análise de 32330 μ m² e tamanho de pixel de 0,32 μ m e aproximadamente 97% dos pontos indexados. As amostras em formato de tiras de 15mm x 7 mm para essa

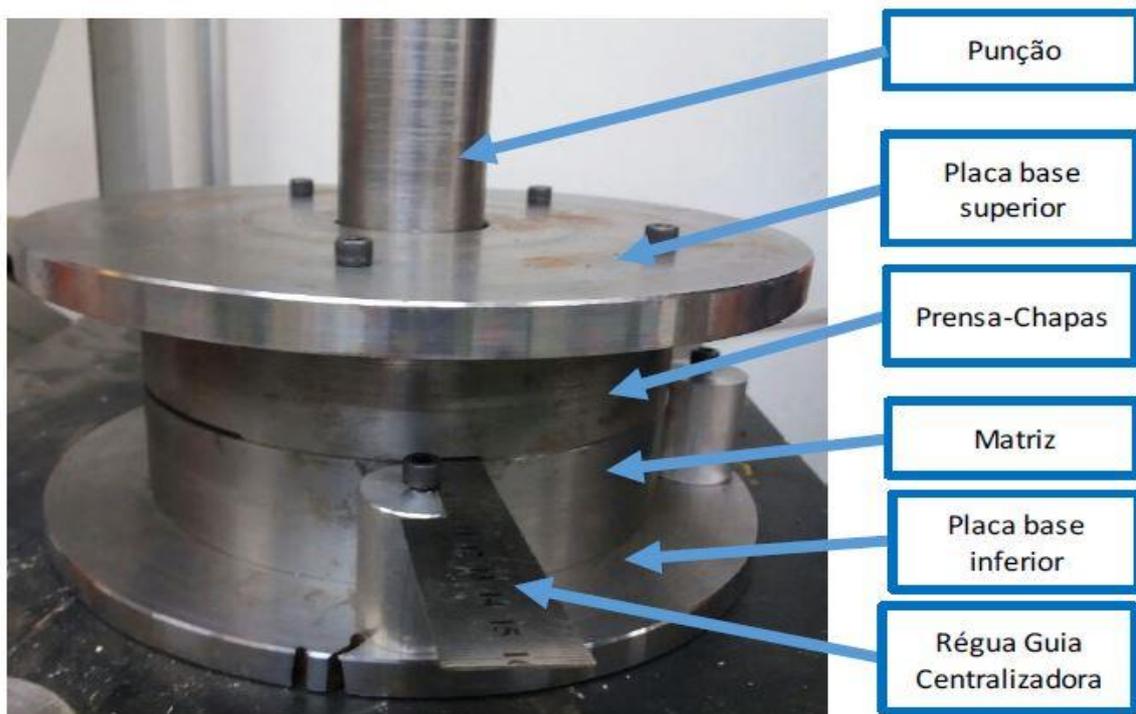
análise foram lixadas com uso de lixas de 1200, 1500 e 2000 mesh e em seguida polidas com pasta de diamante com granulometria de 2,5 μm e 0,5 μm e em seguida realizado o polimento vibratório durante 5 horas com uso do Buehler VibroMet 2.

4.6 Ensaio simulativo

4.6.1 Estampagem

O ensaio Swift para a determinação do LDR do aço AISI 441 nos estados como recebido e laminado foi realizado em blanks com formato circular com diâmetros variando de 80 mm a 110 mm com incremento de 5 mm (80, 85...115), em blanks marcados por intermédio de gravação eletrolítica gerando uma malha com círculos de 10 mm, sendo esse ensaio pautado nas normas ASTM E643-84, NBR5902 e ISO 20482, Figura 36.

Figura 36- Matriz para ensaio Swift



Fonte: Silva (2018).

Esse ensaio para determinação do LDR foi feito em uma matriz circular com diâmetro interno de 52,5 mm e punção esférico de 50 mm de diâmetro, sendo adotado raio de 7 mm para o punção e a matriz. Neste caso, o cálculo do LDR foi feito conforme Equação (16).

$$LDR = \frac{D_o}{D_p} \quad (16)$$

Sendo,

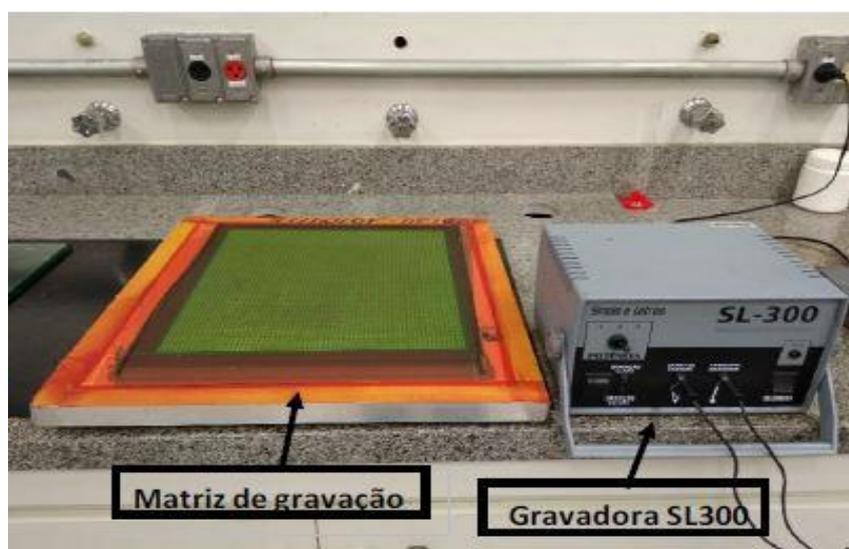
D_o = diâmetro máximo do blank estampado (mm);

D_p = diâmetro do punção (mm).

4.6.2 Marcação blanks e medição da deformação dos copos

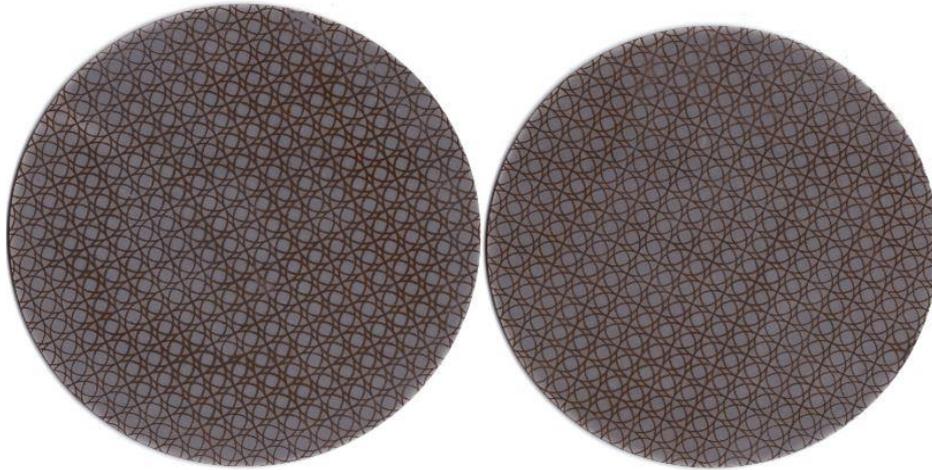
Os blanks que foram utilizados para os ensaios simulativos e para a confecção do produto estampado receberam marcação para posterior medição da deformação verdadeira decorrente da operação de estampagem. Neste caso, os blanks circulares com diâmetros de 80 a 110 mm com incremento de 5 mm receberam marcação eletrolítica com solução líquido gravador C-1 (a base de sais inorgânicos, água e aditivos) no equipamento de gravação eletroquímica SL-300 de círculos com 10mm de diâmetro, conforme Figuras 37 e 38.

Figura 37 Equipamento para gravação eletrolítica



Fonte: Silva (2018).

Figura 38- Blanks após gravação eletrolítica para ensaio simulativo Swift.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Durante o ensaio simulativo Swift foi utilizado o lubrificante MOLYKOTE BR-2 plus, fabricante DUPONT. Os experimentos foram realizados em uma máquina universal de ensaios EMIC DL 200kN, velocidade de avanço de 7 mm/min e avanço máximo do mesmo de 70 mm.

4.6.3 Montagem da curva CLC

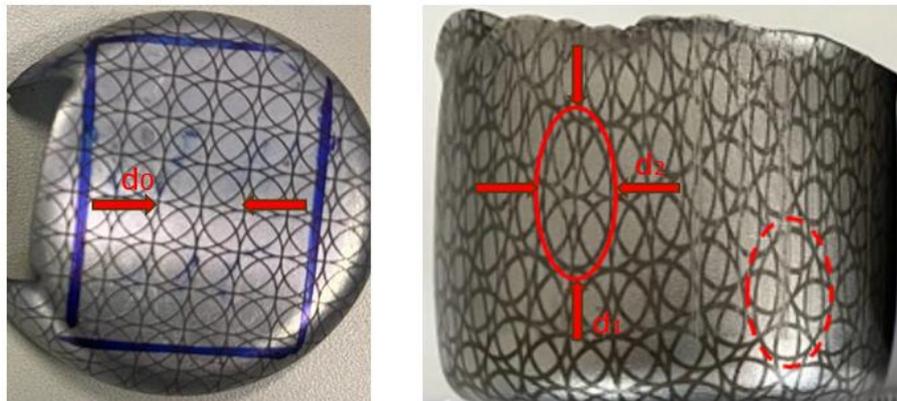
Para a montagem das curvas limite de estampagem, CLC, do material nas duas condições consideradas, como recebido e laminado, foi realizada a partir da medição de deformação verdadeira, Equações (17) e (18), da malha de círculos com diâmetro de 10 mm impressa antes da estampagem. Neste caso, fez-se o registro das imagens dos copos estampado e mensurou-se a variação do diâmetro ao longo dos eixos X e Y, figura 4.9, de modo a identificar os valores da deformação maior e menor da curva CLC com uso do software Image ProPlus 6.0, e as deformações consideradas correspondem ao lado maior e menor da elipse, sendo que, as Equações (17) e (18) remetem as deformações calculadas em função da mudança de forma vista na malha gravada nos blanks.

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad (17)$$

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right) \quad (18)$$

A Figura 39 abaixo demonstra a mudança na malha circular proveniente da deformação durante a estampagem, sendo d_0 o formato circular da malha com 10 mm de diâmetro, d_1 a cota que representa o lado maior da elipse e o eixo Y no diagrama e d_2 a cota que representa o lado menor da elipse e o eixo X no diagrama de construção da curva CLC.

Figura 39 Demonstração do formato da malha em diferentes regiões do copo estampado



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As curvas trazidas no gráfico demonstram como as regiões do copo estampado se comportam quanto ao tipo de esforço predominante, sendo que para regiões onde os esforços são da mesma natureza (tração ou compressão) a malha tende a ficar circular e a razão entre a deformação maior ε_1 e a deformação menor ε_2 tende a ser próxima de 1, ao passo que, quando esses esforços são de natureza distinta, o formato da malha tende a ser elíptico, e a razão entre as deformações tende a valores menores que 1.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

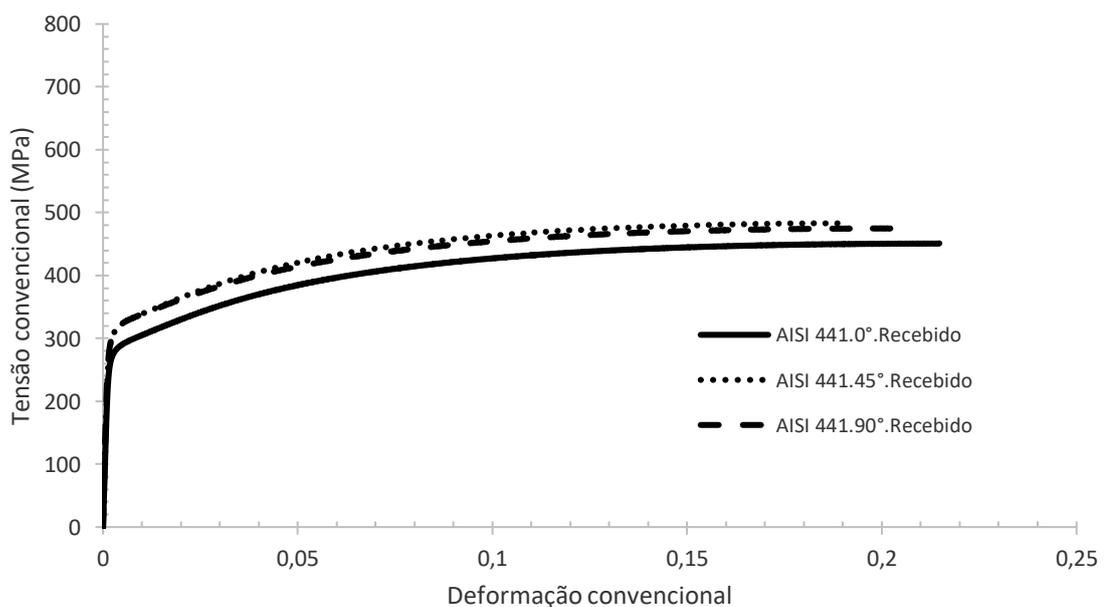
5.1 Caracterização Mecânica

Nas Figuras 40 e 41 são exibidas as curvas tensão-deformação (sendo uma curva representativa de cada direção em relação ao sentido de laminação) convencional do aço AISI 441 nos estados como recebido e laminado a partir de corpos de prova de tração retirados a 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação, DL, respectivamente.

Deve-se considerar que o aço AISI 441 foi deformado em laminação a frio de 20% de deformação efetiva ou 22% de deformação convencional.

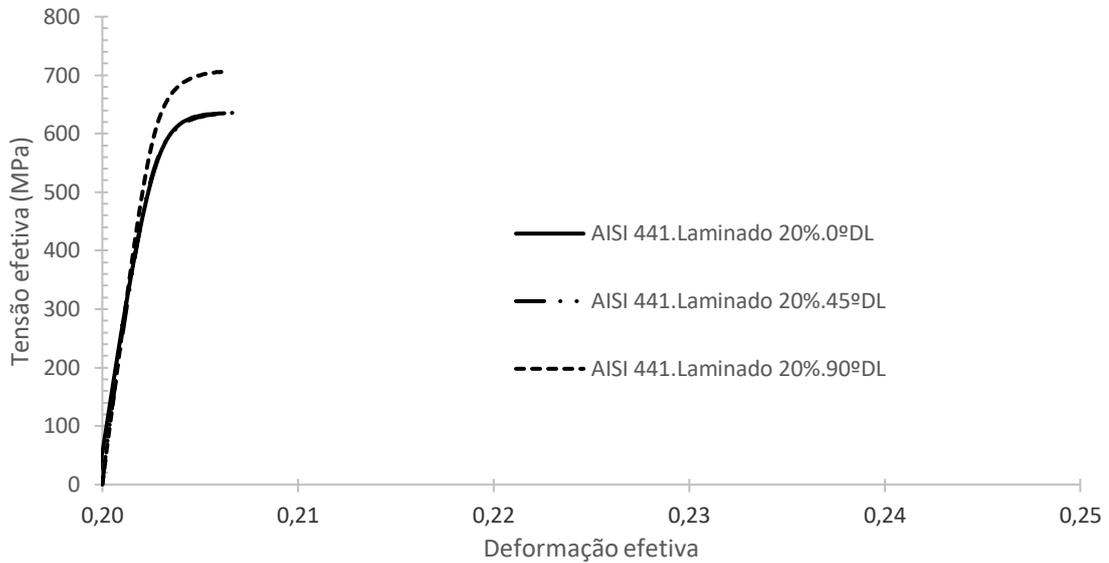
Percebe-se a anisotropia do aço AISI 441 para os dois estados analisados neste trabalho, percebendo ainda a tendência de a laminação ter sido capaz de modificar a anisotropia do material no estado como recebido, quando se nota, pela análise das figura 40 e 40 que a direção de maior resistência mecânica mudou de 45° para 90°, entre os estados como recebido e laminado, respectivamente.

Figura 40 Curvas tensão-deformação convencional do aço AISI 441 como recebido a 0°, 45° e 90° DL.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 41 Curvas tensão-deformação convencional do aço AISI 441 laminado a 0°, 45° e 90° DL.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tais resultados sugerem efeito da anisotropia do material na sua estampabilidade, sendo percebido ainda que a resistência mecânica foi o principal parâmetro modificado entre os dois estados do aço AISI 441, como detectado pela observação da Tabela 2, considerando o cálculo da deformação acumulada, ou seja, o valor do alongamento uniforme do aço AISI 441 foi calculado a partir da soma do valor da pré-deformação em laminação, (0,22), com o valor da deformação uniforme alcançado após a laminação (JACOBS,2023).

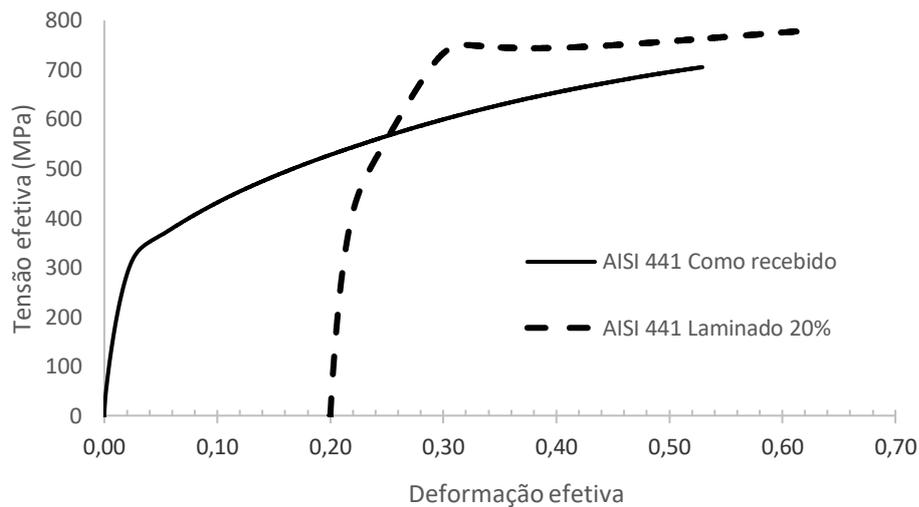
Tabela 2- Resumo das propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 441

Direção	Condição	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)
0° DL	Recebido	282 ± 17,5	456 ± 16,5	22 ± 0,8
	Laminado	633 ± 9,8	636 ± 7,4	22 ± 0,1
45° DL	Recebido	315 ± 4,8	486 ± 4,3	21 ± 1,0
	Laminado	615 ± 29,2	621 ± 28,6	22 ± 0,1
90° DL	Recebido	318 ± 5,2	481 ± 5,8	20 ± 0,2
	Laminado	687 ± 9,6	704 ± 3,2	22 ± 0,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A análise do comportamento mecânico do aço AISI 441 antes da estampagem também foi investigada por meio do ensaio de cisalhamento, como mostrado na Figura 42, que registra as curvas de tensão-deformação efetiva do aço AISI 441 nos estados como recebido e laminado.

Figura 42 Curvas tensão-deformação efetiva do aço AISI 441 laminado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota-se o endurecimento do aço AISI 441 após a laminação a frio, além da tendência para a coincidência das curvas com o acréscimo da deformação, indicando que a mudança subestrutural e cristalográfica foi parcialmente modificada após a laminação, mas não o suficiente para manter esse endurecimento.

A anisotropia inicial do aço AISI 441 nos estados como recebido e laminado também foi investigada com uso do ensaio de tração, Tabela 3, notando-se a queda da anisotropia normal média, R_m , indicando assim a maior tendência de redução da espessura no estado laminado quando comparado com o estado como recebido. Além disso, sendo a anisotropia planar maior no estado laminado, verifica-se o aumento da ocorrência do fenômeno de “orelhamento” no estado laminado, sendo isso associado ainda à maior diferença entre os valores de anisotropia nas direções analisadas (REED-HILL, 1982; DUTRA, 2001).

Tabela 3- Parâmetros de anisotropia do aço inoxidável AISI 441

Condição	Anisotropia Planar, ΔR	Anisotropia Normal Média, Rm	R _{0°}	R _{45°}	R _{90°}
Recebido	0,140	1,429	1,310	1,359	1,688
Laminado	0,228	1,133	1,078	1,019	1,417

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os valores da dureza Vickers do aço AISI 441 em função da condição deste material estão apresentados na Tabela 4. Como previsto, nota-se o endurecimento promovido pelo encruamento da laminação a frio. Contudo, deve-se considerar a possível presença de carbonetos de Nb no aço AISI 441 decorrente do processamento termomecânico aplicado durante a processo siderúrgico (QIAN et al., 2016).

Tabela 4- Dureza Vickers aço inoxidável AISI 441

Condição	Dureza Vickers (HV)
Recebido	167 ± 2,0
Laminado	260 ± 8,7

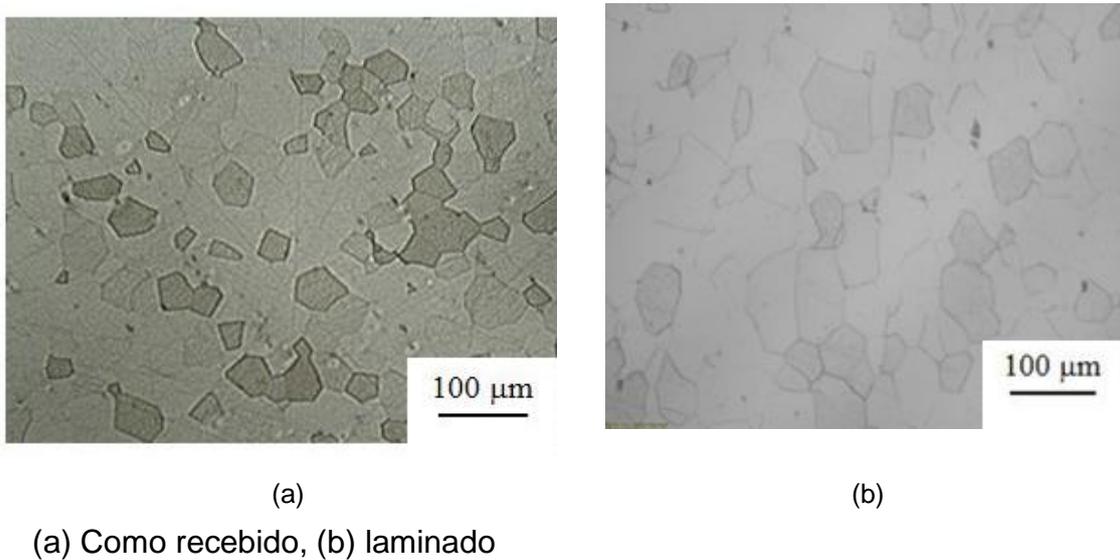
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.2 Caracterização Estrutural

5.2.1 Microscopia óptica

As fotomicrografias do aço AISI 441 nos estados como recebido e laminado estão exibidas na Figura 43, percebendo-se apenas a presença da fase ferrita, e como destacado no item 4.1 a semelhança quanto ao tamanho de grão, $57,8 \pm 16,0 \mu\text{m}$ e para o estado como recebido e de $55,1 \pm 15,8 \mu\text{m}$ para a condição laminado a frio, a pouca alteração no tamanho de grão medido no sentido longitudinal da chapa, mostra como a carga aplicada na laminação não foi suficiente para promover alongamento de grão no sentido avaliando, sugerindo que, pela conservação do volume, que o grão foi mais deformado no sentido transversal.

Figura 43- Fotomicrografias do aço AISI 441

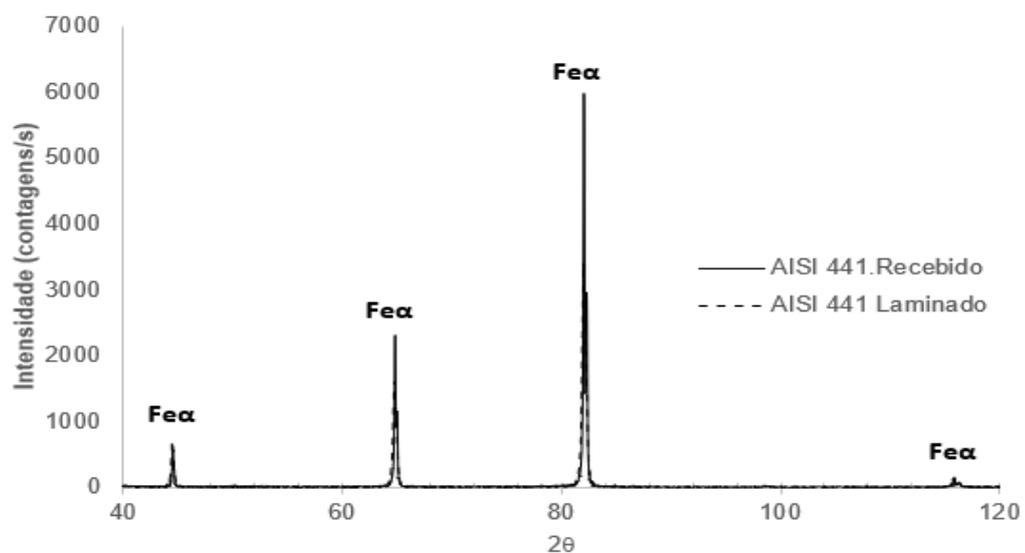


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.2.2 Difração de raios X

Os difratogramas do aço AISI 441 nos estados como recebido e laminado são apresentados na Figura 44, confirmando os resultados da microscopia óptica quanto à presença de apenas uma única fase: ferrita, $Fe\alpha$. Tal resultado serviu de suporte quanto à identificação da fração de fases por EBSD.

Figura 44- Difratogramas aço AISI 441 nos estados como recebido e laminado



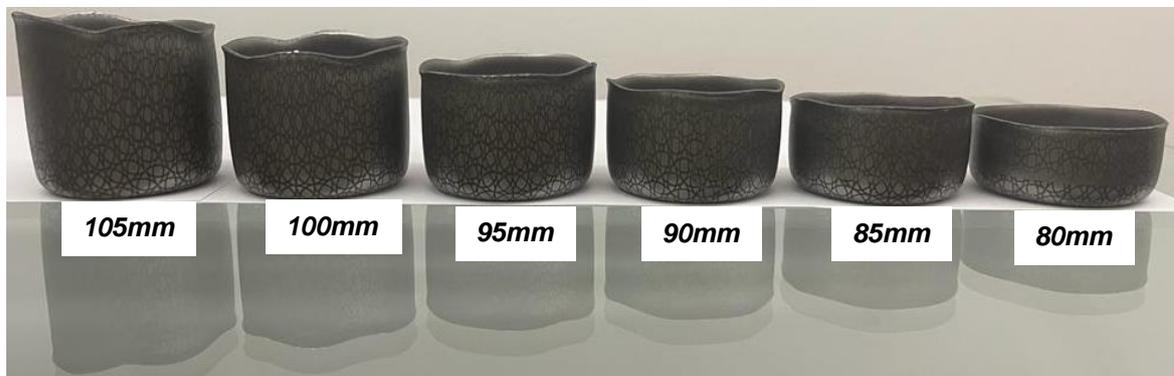
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.3 Estampagem

5.3.1 LDR

Na Figura 45 são mostrados os copos do aço AISI 441 deformados a partir do estado como recebido desde o diâmetro do blank de 80 mm até 105 mm com incremento de 5 mm, sendo percebida a maior intensidade do fenômeno de orelhamento a partir do diâmetro de 95 mm.

Figura 45- Copos escalonados do aço AISI 441 como recebido com diâmetro de blank de 80 mm a 105 mm.



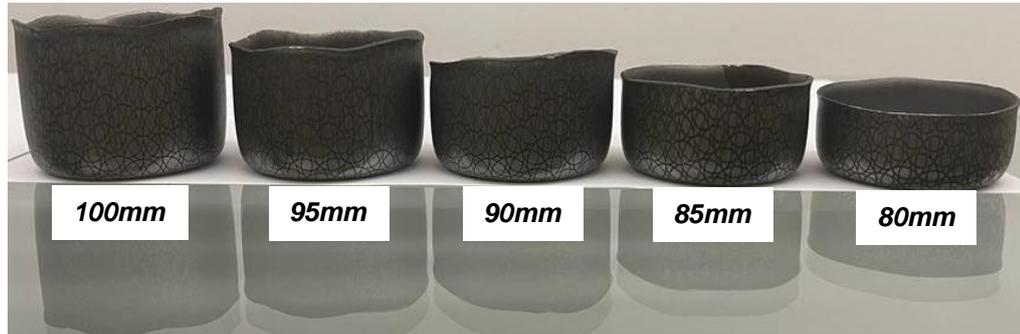
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De modo análogo, na Figura 46 é exibida a evolução dos copos do aço AISI 441 no estado laminado desde o diâmetro de 80 mm até 100 mm, com o mesmo incremento de 5 mm, e comparando-se a ocorrência do orelhamento, nota-se a antecipação desse defeito a partir do copo com diâmetro do blank de 90 mm, como previsto pelo maior valor do coeficiente de anisotropia planar (vide Tabela 3).

Durante a fabricação de uma peça, muitas vezes é necessária a realização do processo de embutimento em várias etapas quando não é possível realizar a estampagem em etapa única, devido à relação entre os valores do diâmetro do blank D_0 e o diâmetro do punção, D_p , ser muito grande, necessitando assim que a operação seja dividida em etapas até a obtenção do produto desejado. Deste modo, o número de operações necessárias para se obter o produto depende da relação de embutimento, definindo assim, a habilidade de um material de ser estampado, ou seja,

a sua estampabilidade, como indicado pelo valor da razão crítica de estampagem, LDR, indicada na tabela 5 (CASTRO, 2005).

Figura 46- Copos escalonados do aço AISI 441 laminado com diâmetro de blank de 80 mm a 100 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os resultados atestam o efeito do estado inicial na estampabilidade do aço AISI 441, apesar de a diferença do limite de estampagem ter sido reduzida. Contudo, caso seja excedido esse limite será observada a ruptura da chapa que ocorreu no raio do fundo da peça estampada, como registrado pelos detalhes exibidos nas Figuras 47 e 48 (CASTRO ,2005).

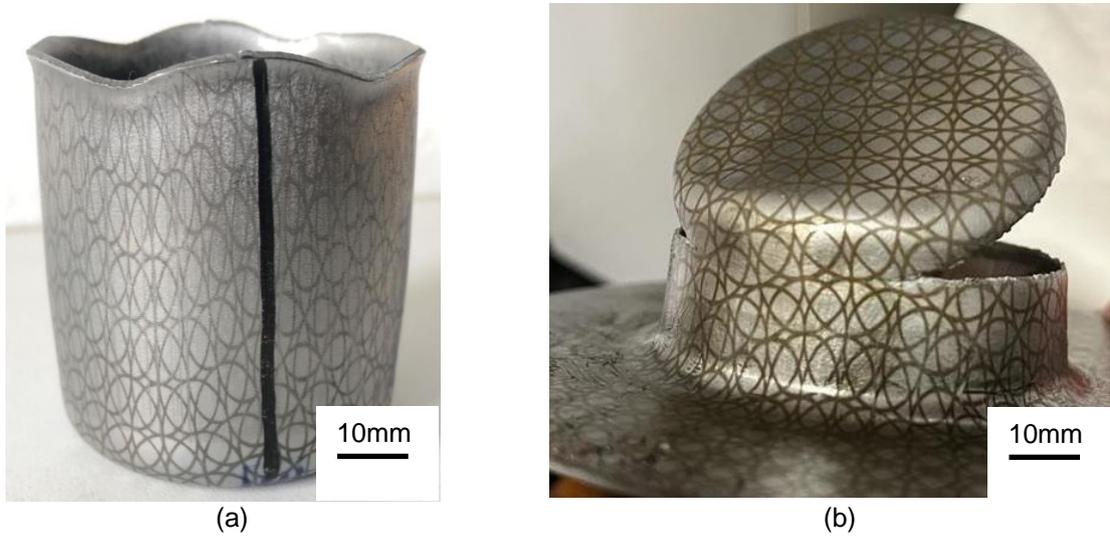
O valor do LDR nos dois estados do aço AISI 441 analisados neste trabalho estão expostos na Tabela 5, sendo considerado o valor do último diâmetro de blank que não rompeu no ensaio. Como previsto, nota-se um valor ligeiramente maior para o aço AISI 441 no estado como recebido, sendo isso associado ao encruamento prévio decorrente da laminação a frio que limitou a ductilidade desse aço durante a estampagem.

Tabela 5- Valores LDR do aço AISI 441

Condição	D ₀	D _p	LDR
Recebido	110	50	2,2
Laminado	105	50	2,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

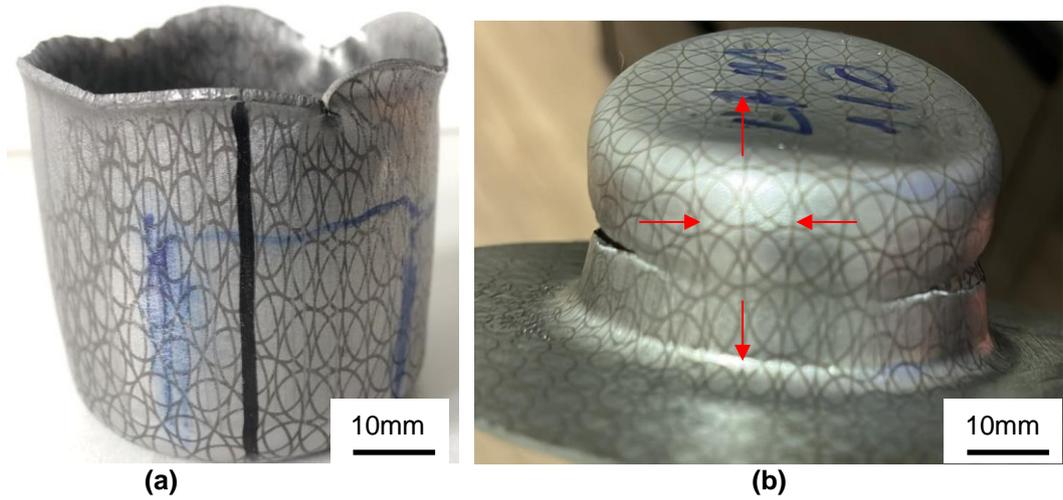
Figura 47- Copos estampados como recebido, blanks com dimensão de:



(a) 110 mm e (b) 115 mm.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 48- Copos estampados laminado, blanks com dimensão de:



(a) 105 mm e (b) 110 mm.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota-se ainda que para todas as amostras, o modo inicial de deformação foi o embutimento e o modo final foi o estiramento, como exibido pelas setas representadas em um dos círculos impressos na Figura 48(b), com a presença do esforço de tração ao longo da altura do copo e da compressão na direção transversal.

No processo de embutimento tem-se um estado biaxial de tensões, sendo aplicadas de forma simultânea as deformações de tração e compressão. A estampabilidade tem melhor efeito com a redução das deformações perpendiculares à espessura e dessa forma, aumenta as deformações na largura e no comprimento. É desejável para um aço de boa embutibilidade que ele apresente elevado coeficiente de anisotropia normal média, ou seja, alta preferência em se deformar no plano da chapa e pouco na espessura, e um coeficiente de anisotropia planar perto de zero, isto é, o mínimo de variação planar.

Pode-se dizer que esses dois coeficientes são os de maior relevância na definição do comportamento de um material em estampagem profunda, (MESQUITA, 1997; ROCHA, 2006). Tal abordagem pode ser confirmada pelos dados da tabela 3 que evidenciam menor valor de (ΔR) e maior (R_m) para o estado como recebido do aço AISI 441.

No estiramento as deformações devem ser distribuídas de forma homogênea, com a finalidade de retardar o máximo possível o início do processo de estricção do material ensaiado e, conseqüentemente, a fratura, sendo importante conciliar a resistência mecânica com a tenacidade do material para possibilitar o maior aproveitamento, em termos da habilidade de um material suportar maior profundidade de embutimento (LABIAPARI, 2001).

Esses resultados de estampagem associados aos dados de anisotropia sugerem que a anisotropia afetou a estampabilidade do aço AISI 441. Com o objetivo de melhor investigar tal variável, no item 5.4 são exibidos os resultados da análise da textura desse material.

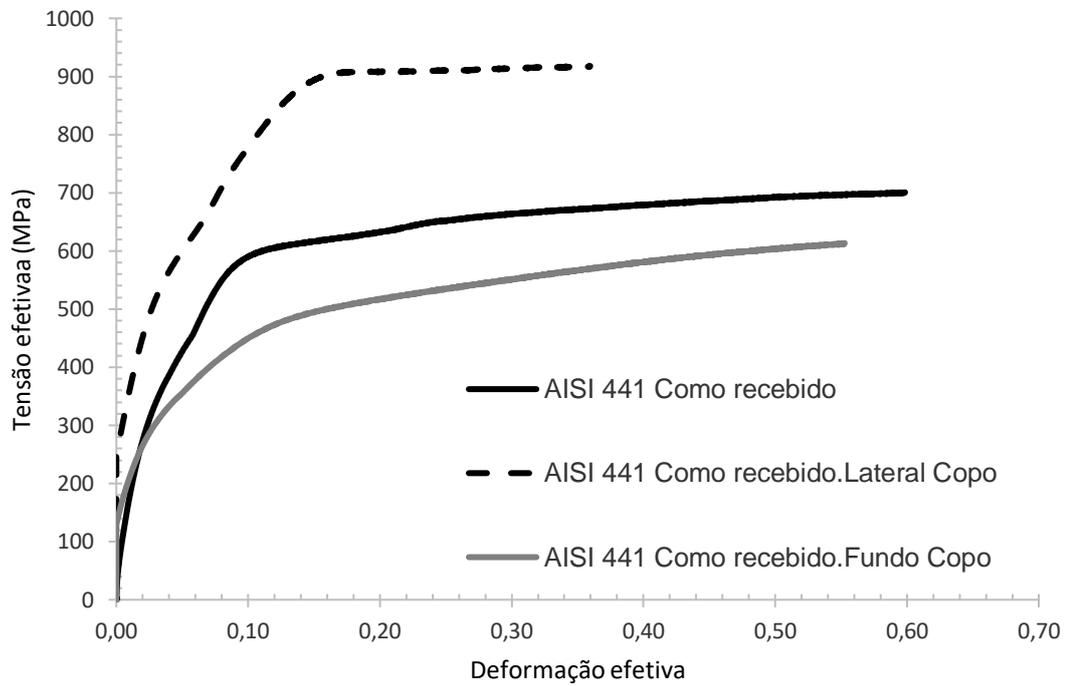
5.3.2 Comportamento Mecânico

O comportamento mecânico do aço AISI 441 após a estampagem foi investigado por meio do ensaio de cisalhamento a partir da retirada de corpos de prova no fundo e na lateral dos copos estampados (vide item 4.4.3) para os valores de diâmetro de blank que definiram o limite de estampabilidade, ou seja, de 110 mm para o estado como recebido e de 105 mm para a condição laminado.

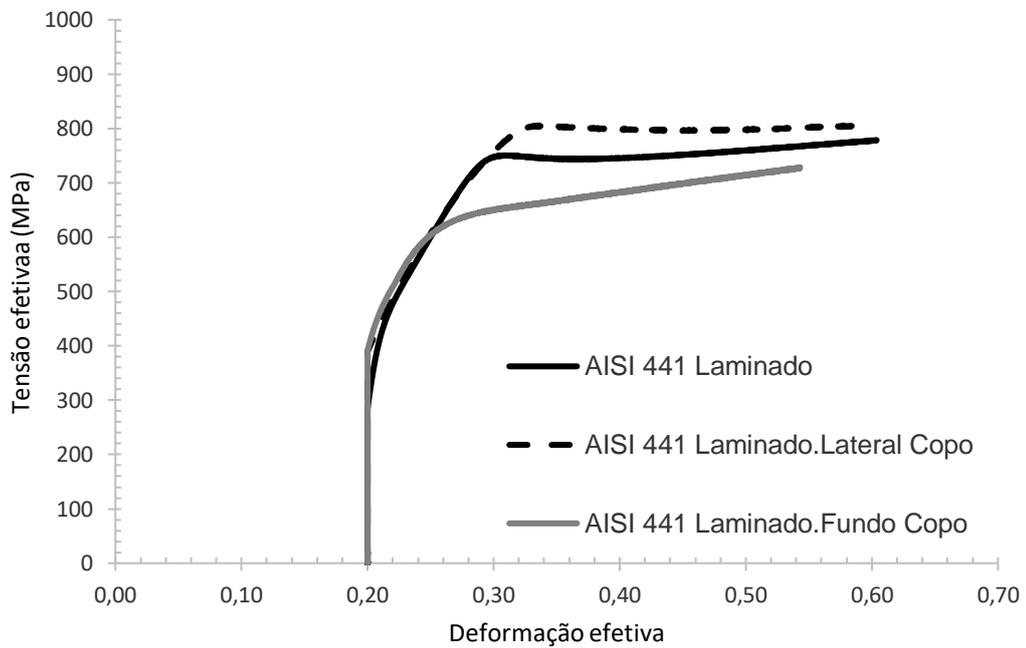
Os resultados expostos na Figura 49 (sendo uma curva representativa de uma das amostras avaliadas) revelam o comportamento mecânico diferenciado entre as posições do copo embutido para os dois estados do aço AISI 441. Em comum, percebe-se o endurecimento na região da lateral dos copos embutidos e o ligeiro amaciamento no fundo dos copos, quando comparado com o estado anterior à estampagem do aço AISI 441 para os dois estados avaliados neste trabalho.

O endurecimento na região da lateral dos copos indica que essa foi a região que sofreu a maior quantidade de deformação plástica, sendo tal endurecimento associado ao encruamento decorrente do estiramento como revelado nas Figuras 47(a) e 48(a) a partir do alongamento da malha de círculos. Já o ligeiro amaciamento detectado no fundo do copo pode ser atribuído ao carregamento cíclico que o material experimentou desde a aba do copo até chegar na região do fundo do copo, associado à ocorrência de efeito Bauschinger, além de aspectos de processo, como a ação do atrito e a folga entre o punção e a matriz (HE et al, 2022).

Figura 49 Curvas tensão-deformação efetiva do aço AISI 441 antes e após a estampagem



(a)



(b)

(a) Como recebido, blank 110 mm, (b) laminado, blank 105 mm.

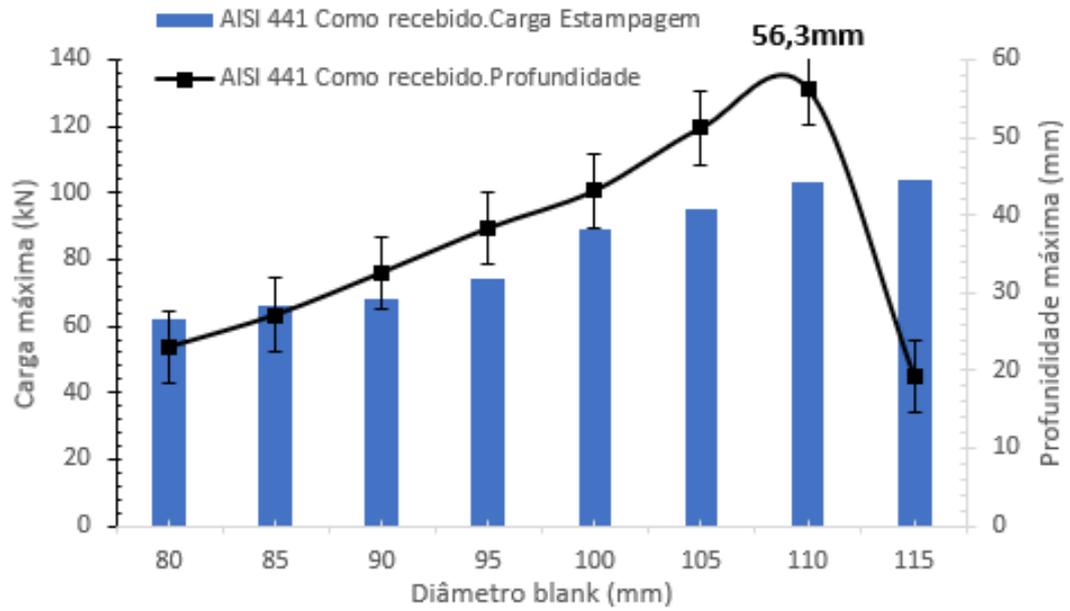
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Comparando a resposta entre os dois estados do aço AISI 441, é possível observar que o endurecimento experimentado no estado como recebido foi maior que o detectado na condição laminado, apesar dessa última ter sofrido uma quantidade de pré-deformação em laminação a frio e conseqüentemente, uma quantidade maior de deformação plástica acumulada. No entanto, tal acúmulo de deformação plástica limitou a plasticidade do aço AISI 441 pré-deformado por laminação a frio, como percebido pelo menor valor de LDR (vide Tabela 5).

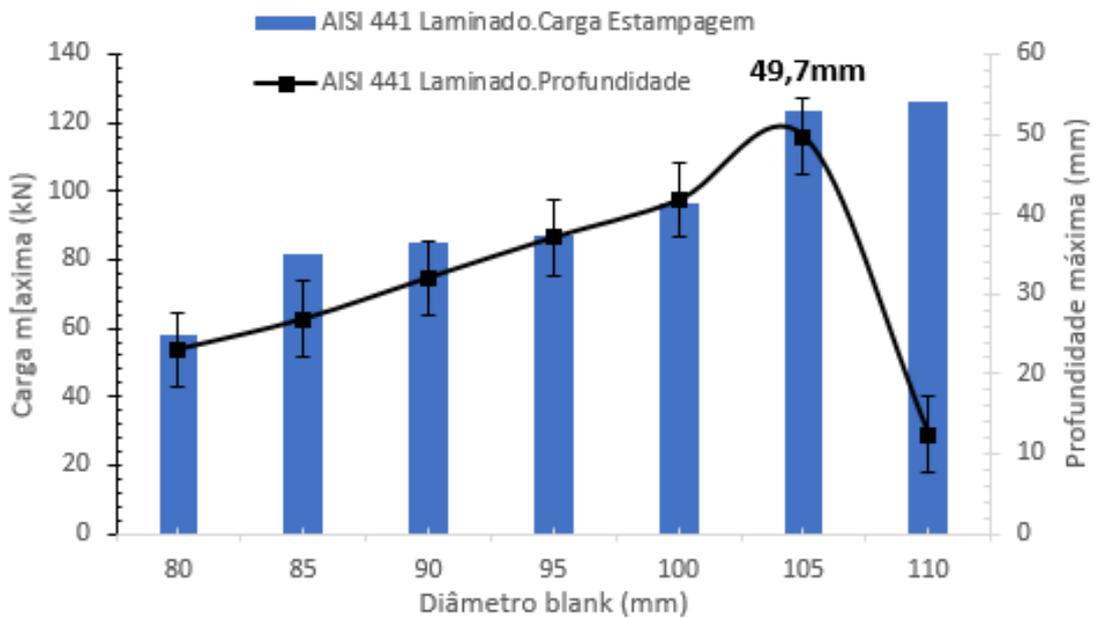
Por fim, nota-se ainda que para ambas as regiões dos copos estampados, a tendência de coincidência das curvas de tensão-deformação efetiva com o estado anterior à estampagem no estado laminado, isso sugere que a mudança subestrutural assumida pelo aço AISI 441 após a estampagem quando comparado com o estado anterior à essa operação foi pequena nos dois estados analisados neste trabalho, (Schmidová, Klejch, Sunilkumar, 2023).

Uma vez que no estado como recebido o aço AISI 441 obteve um valor de LDR maior que o detectado no estado laminado, 2,2 contra 2,1, respectivamente (vide Tabela 5), a profundidade máxima do copo como recebido foi maior que a percebida para o estado laminado (56,3 mm contra 49,7 mm, respectivamente), Figura 50, contribuindo assim para o incremento do endurecimento por encruamento e, conseqüentemente, para a maior resistência mecânica do aço AISI 441 no estado como recebido.

Figura 50- Carga e profundidade máxima após estampagem aço AISI 441



(a)



(b)

(a) Como recebido, (b) laminado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

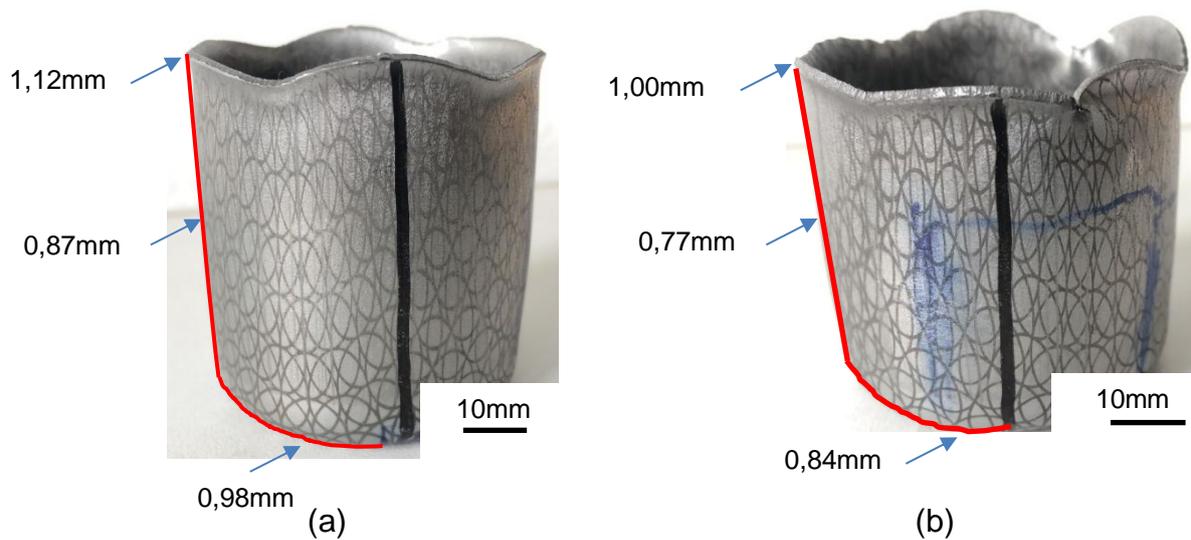
Tais resultados sugerem que a intensidade da mudança do arranjo subestrutural, assim como da orientação cristalográfica preferencial assumida pelo aço AISI 441 após a operação de estampagem foi maior no estado como recebido que no laminado. Deve-se considerar ainda que a aplicação de passes de deformação por laminação a frio tende a intensificar a fibra γ , plano (111), que é favorável à estampagem dos aços inoxidáveis ferríticos de modo que a sua modificação após a estampagem possivelmente será menor, (LIU; LIU; WU, 2023). No entanto, tal análise será feita a partir do estudo da textura do aço AISI 441 antes e após a estampagem para os dois estados desse material, vide item 5 deste trabalho.

5.3.3 Deformação Plástica na Estampagem

A estampagem aplicada neste trabalho pode ser considerada como sendo uma operação de 3 estágios, como descrito por Barzegari e Khatir (2019), consistindo no posicionamento do punção com a chapa, o avanço do punção até as cavidades da matriz e a subsequente remoção do punção. Nesta condição, o rasgamento da chapa tipicamente ocorre em duas regiões preferenciais: no raio inferior ou na parede do copo.

Neste trabalho, como observado nas Figuras 47(b) e 48(b), o rasgamento da chapa ocorreu na parede dos copos do aço AISI 441, incentivando assim, a necessidade de medição da variação da espessura dos copos desde a aba até a região do fundo dos copos. Considerando isso, é exibida na figura 51 a variação da espessura da chapa nos estados como recebido, Figura 51(a), e laminado, Figura 51(b), respectivamente, admitindo que a espessura inicial do blank no estado como recebido era de 1,0mm e no estado laminado 0,84, o que corresponde à 0,20 de deformação efetiva em laminação.

Figura 51- Distribuição da espessura dos copos estampados do aço AISI 441



(a) Como recebido, (b) laminado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

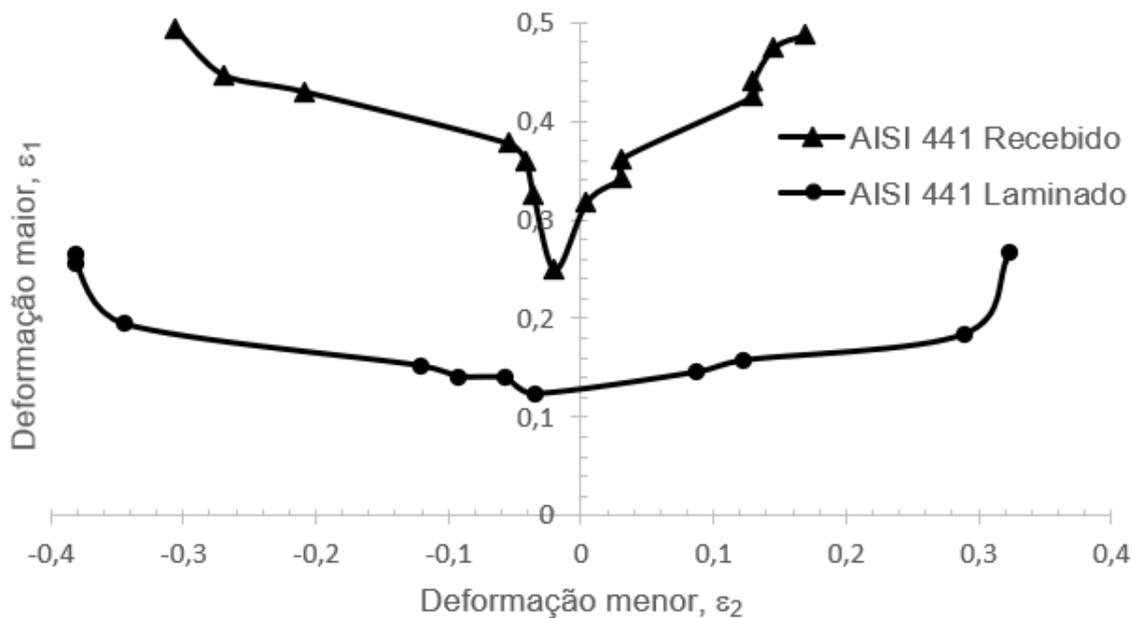
A variação da espessura da chapa está diretamente relacionada com o estado de tensões atuante durante a estampagem. Na região da aba do copo estão dispostas a tensão de compressão decorrente da ação do prensa-chapas, além do estiramento radial e a compressão circunferencial, sendo essa última associada ao aumento da espessura experimentado nesta região do copo (Tan; Mori; Abe; 2008; Hosford, Caddell, 2011).

Já na lateral do copo, existe a tração responsável pelo estiramento do copo, tensões de compressão que podem ocasionar o afinamento da chapa, além de esforços de atrito entre a chapa e a matriz, assim como entre a matriz e o punção.

Por fim, no fundo do copo há a existência de tensões de compressão decorrentes da ação do punção, sendo as mesmas transmitidas ao restante do copo por meio de tensões de tração radial, não ocasionando mudança relevante na espessura da chapa nessa região dos copos estampados, (Tan; Mori; Abe, 2008)

A variação da espessura da chapa pode ser um indicativo de falha da chapa durante a operação de estampagem, que necessita ser associada à previsão do limite de conformabilidade a partir de um método que avalie a máxima deformação que um material pode suportar até a ocorrência da fratura. Considerando isso, com o objetivo de mensurar a quantidade de deformação efetiva (verdadeira) que os copos estampados sofreram nos dois estados do aço AISI 441, foi realizada a medição da deformação da malha de círculos impressa nos blanks após a estampagem, gerando a curva limite de conformação exposta na Figura 52.

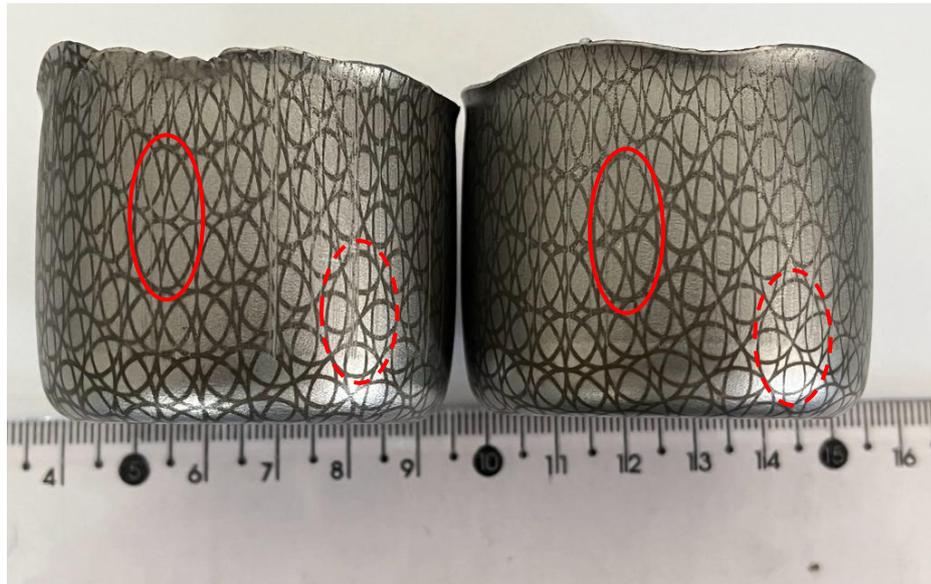
Figura 52 Curva limite de conformabilidade do aço AISI 441



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como previsto pelos resultados de anisotropia e LDR, o limite de deformação do aço AISI 441 no estado laminado foi menor que na condição como recebido, sendo predominante o modo de deformação por estiramento uniaxial (embutimento, círculo cheio) e em alguns pontos a presença do estiramento biaxial (expansão, círculo tracejado), como destacado na Figura 53.

Figura 53- Indicação da distribuição de deformação copos estampados



(a) Laminado, blank 100 mm, (b) como recebido, blank 100 mm.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

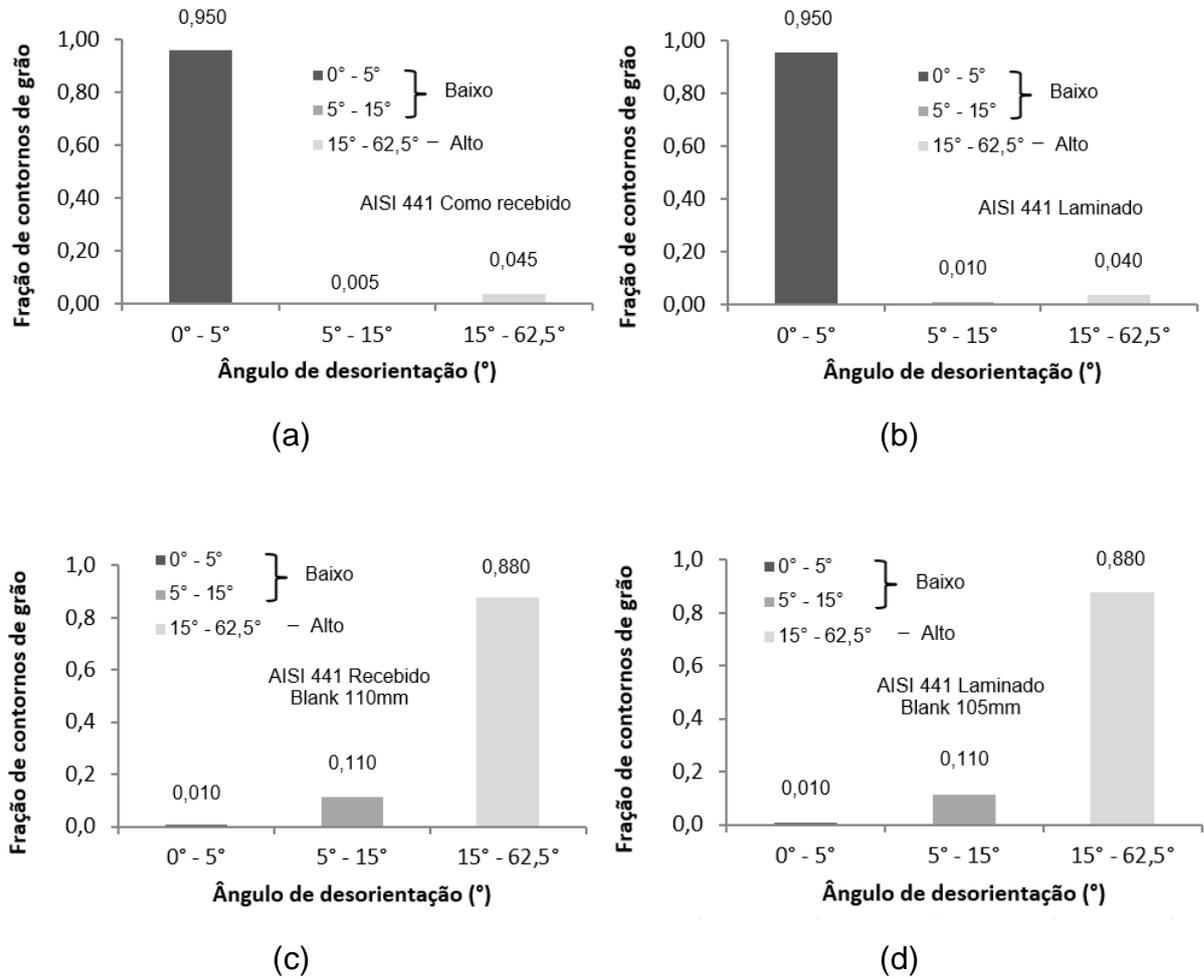
5.4 Textura

De acordo com Rodrigues et al (2019) as texturas de aços ferríticos, são representadas através de fibras, sendo as principais fibras em aços ferríticos a fibra α , Fibra γ e Orientação de Goss. O ângulo de desorientação dos grãos antes e após a estampagem do aço AISI 441 para os dois estados avaliados neste trabalho estão exibidos na Figura 54, percebendo-se a nítida modificação dessa característica com a estampagem. Antes da estampagem, verifica-se a predominância da desorientação dos grãos na faixa de 0° a 5° (aproximadamente 95% do total de grãos analisados para os dois estados) e após a estampagem a concentração dessa desorientação dos grãos ficou concentrada no intervalo de 15° a $62,5^\circ$ (87% no estado como recebido e 92% na condição laminado), para os dois estados do aço AISI 441.

A prevalência de contornos de grão de baixo ângulo, na faixa de 0° a 5° , antes da estampagem para ambos os estados do aço AISI 441 é típica de uma subestrutura que exhibe baixa densidade de linhas de discordâncias quando comparada à

predominância de contornos de grão de alto ângulo, na faixa de 15° a $62,5^{\circ}$, como detectado após a estampagem, (Wining, Rollet, 2005; Barzegari, Khatir, 2019).

Figura 54- Distribuição da desorientação dos grãos do aço AISI 441



(a) Como recebido, (b) laminado, (c) recebido blank 110 mm, (d) laminado blank 105 mm.

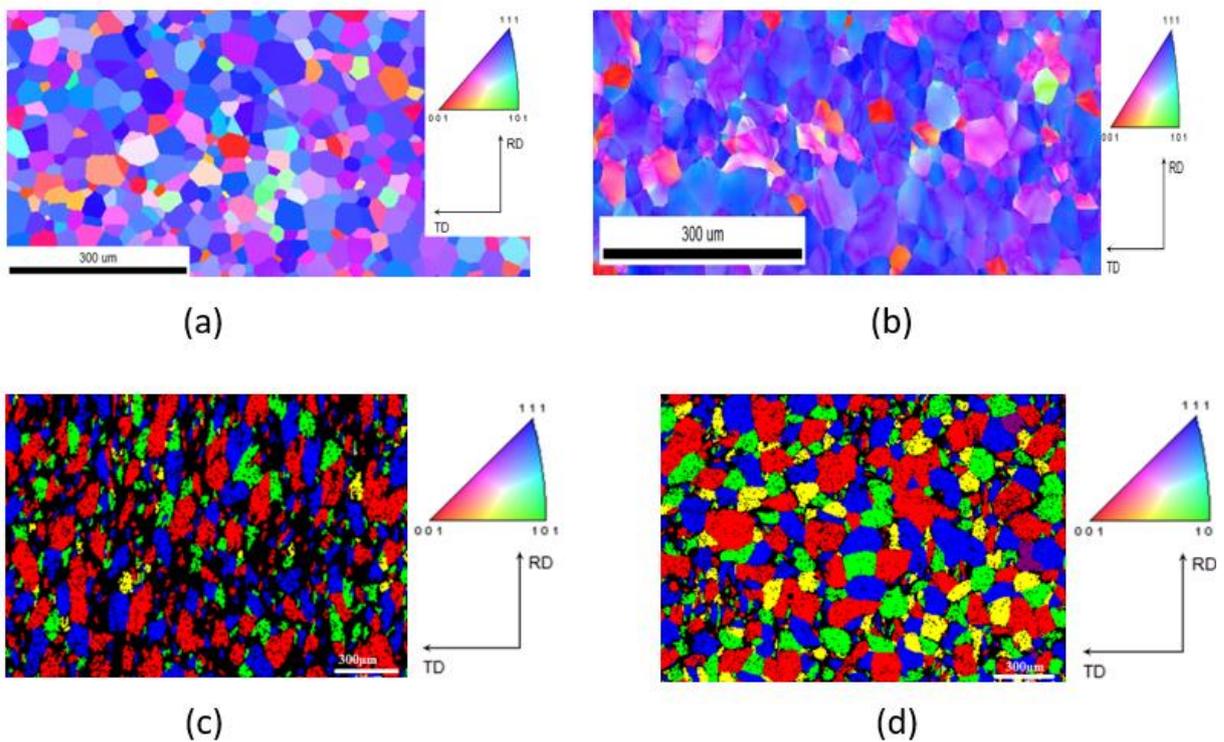
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 55 é exibido o mapa de orientação dos grãos antes (Figura (a) e (b)) e após (Figura (c) e (d)) a estampagem, sendo percebida a mudança de uma distribuição homogênea em torno da orientação (111), condição essa típica para a estampagem dos aços inoxidáveis ferríticos, favorável à fibra γ , por reduzir, dentre outros problemas, a ocorrência de imperfeições superficiais, como a presença de

estrias, além de reduzir a presença da fibra θ (100), (Oliveira et al; 2013 e Gao et al; 2023). Após a estampagem, nota-se, para ambos os estados, uma orientação mais heterogênea, em torno de (001). Tal heterogeneidade confirma a desorientação dos grãos, como indicado na Figura 54.

Segundo Penedo (2023) o gradiente de textura nas amostras está relacionado com as diferentes formas de deformação durante a laminação. Na superfície das chapas a deformação por cisalhamento é dominante devido ao contato da chapa com os cilindros de laminação. A deformação por cisalhamento continua a diminuir ao longo da espessura (GAO et al, 2013).

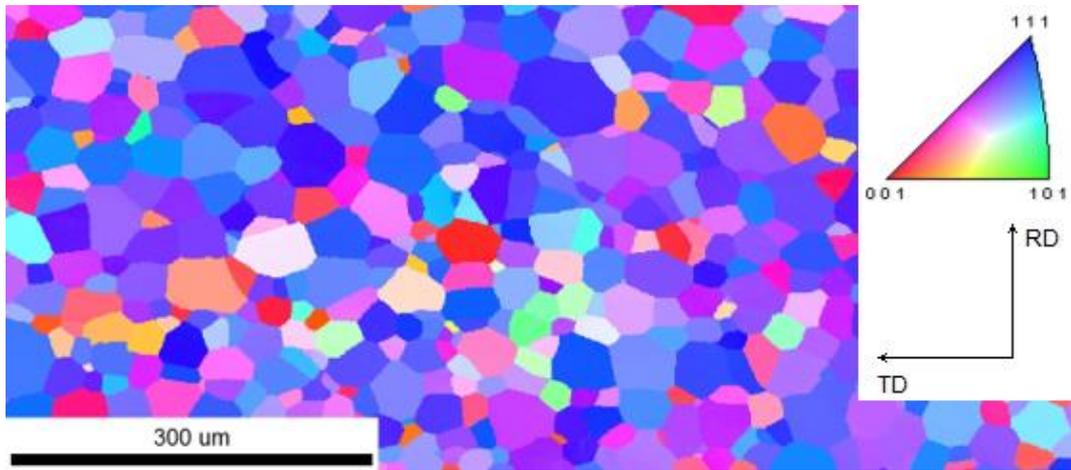
Figura 55- Mapa de orientação dos grãos



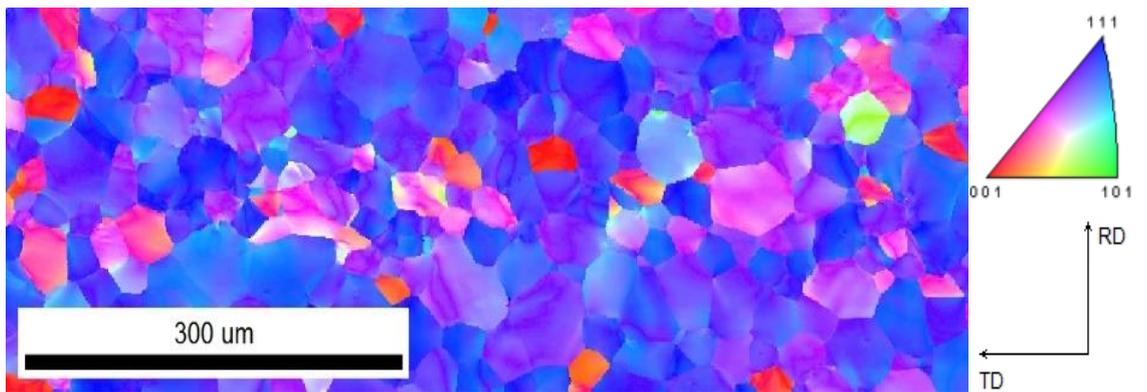
(a) Como recebido, (b) laminado, (c) recebido blank 110 mm, (d) laminado blank 105 mm.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

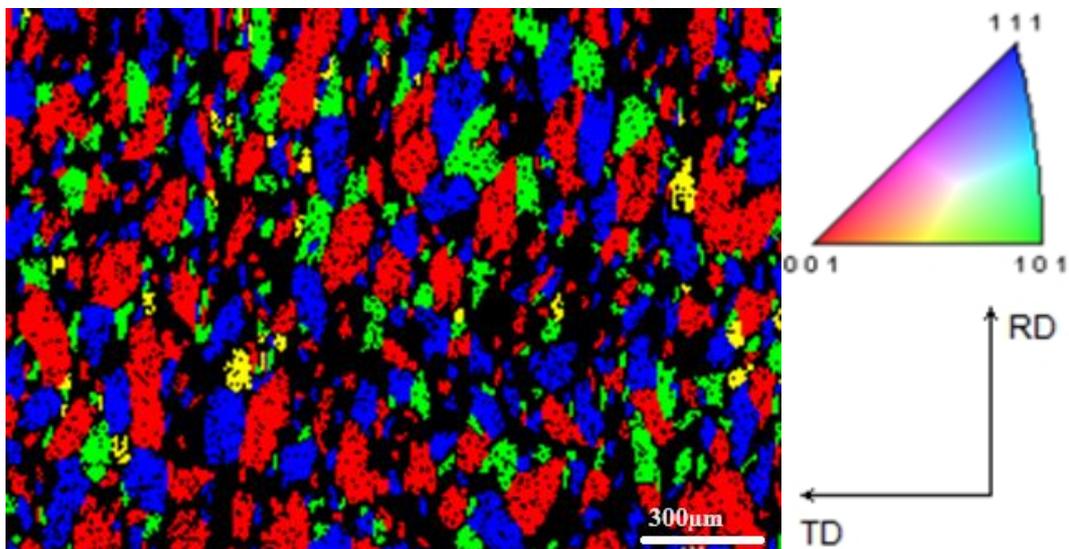
Abaixo segue a Figura 55 de forma individual e com zoom para uma melhor verificação das figuras de polo.



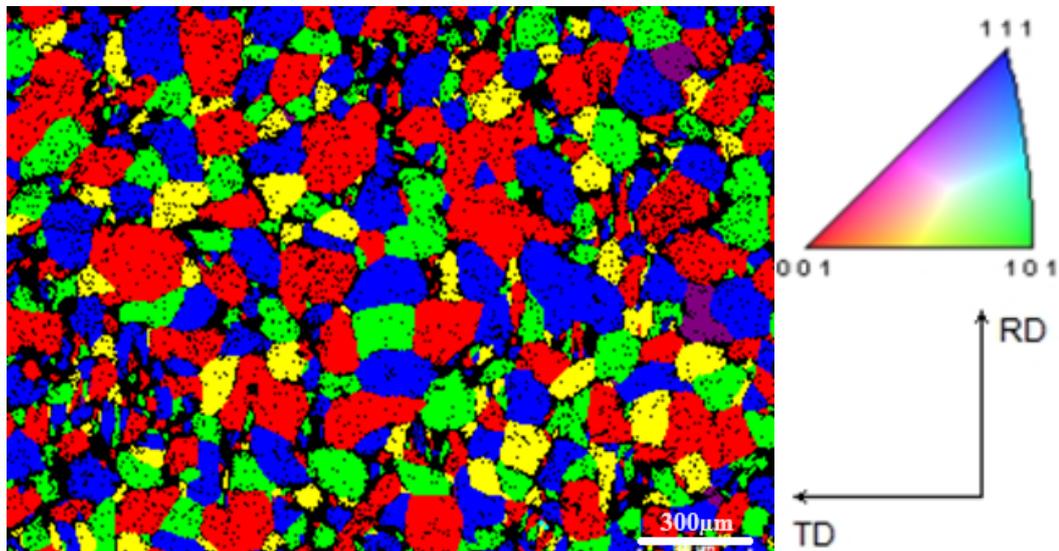
(a)



(b)



(c)



(d)

As figuras de polo, Figura 55, corroboram o aumento da diferença angular após a estampagem, sendo tal desorientação maior na orientação [101] e mais intensa no estado laminado que no recebido.

Pode-se afirmar que, de modo geral, a conformabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos é melhorada pelo aumento do parâmetro de anisotropia normal média, R_m , e pela intensificação da textura na orientação (111), além da consequente redução das demais texturas.

De modo adicional, o ajuste das condições de processo como a adoção de práticas industriais que favoreçam a intensificação da fibra γ , e a redução da imperfeição superficial formadora do estriamento nos aços inoxidáveis ferríticos a partir do controle da quantidade da deformação plástica promovida durante as etapas de laminação a quente e a frio, a precipitação de Nb em solução sólida como meio de dificultar a recristalização durante a laminação a quente, além da adoção de uma rotina de fabricação dos aços inoxidáveis ferríticos que combine os fenômenos de recristalização e laminação de modo a obter uma orientação cristalográfica favorável à conformabilidade aços inoxidáveis ferríticos (LIU et al.; 2023).

Os resultados de textura a partir da análise das figuras de polo indicaram que a estampagem do aço AISI 441 intensificou a orientação (101), além de ter incrementado a desorientação dos grãos, de modo mais acentuado no estado laminado.

6 CONCLUSÕES

O estudo do efeito do estado inicial na estampabilidade do aço AISI 441 foi estudado neste trabalho e os seguintes resultados foram observados:

- a) estampabilidade similar para os estados como recebido e laminado, exibindo parâmetro LDR igual a 2,2 e 2,1, respectivamente;
- b) a tendência de endurecimento na parede e amaciamento no fundo dos copos a partir dos ensaios de cisalhamento, além do aumento da espessura na região próxima à borda e afinamento próximo ao raio inferior dos copos;
- c) ocorrência de desorientação de contornos de grão de baixo ângulo (0° a 5°) antes da estampagem para desorientação de contornos de grão de alto ângulo (15° a $62,5^\circ$) após a estampagem do aço AISI 441;
- d) o aumento da intensidade da fibra γ após a laminação a frio de 20% de deformação efetiva.

REFERÊNCIAS

ALTAN, T., TEKKAYA, A. E. Sheet Metal Forming – Fundamentals. ASM International. Book. 2012.

ASTM G40, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, ASTM International, West Conshohocken, 2005.

BANABIC, Dorel. Sheet Metal Forming Processes. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

BARZEGARI, M.M., KHATIR, F.A. Study of thickness distribution and dimensional accuracy of stamped metallic bipolar plates, International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, 31360-31371, 2019.

BEUREN, Jair; TRAVI, Tatiana. Processos de Aquecimento nos Aços. [s.1]:[s.n],p.28; 2000.

CASTRO, Frederico de Magalhães: Estudo Numérico e Analítico das Evoluções da Força e da Espessura em Chapas de Aço Livre de Intersticiais Durante Processamento por Embutimento e Ironing. 2005. 63 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

CHANDLER, H. FLINT, V. DAVIDSON, G.M.; BONRING, R.L; POWERS C. L. Heat Treater's Guide Practices Produces for Irons and Steels – 2nd Edition. American Society of Metals Publishing, 1995.

CHEMIN, Antônio Ravilson Filho: Avaliação das Deformações de Chapas Finas e Curvas CLC Para Diferentes Geometrias de Punções. 127 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

CODA, R.C; Laminação – Produtos Longos de Aço Laminado a Quente. Porto Alegre, UFRGS, 2000.

DIETER, G., Mechanical Metallurgy.: McGraw Hill, 1986.

DUDHAT, P., et al. Study of Deep Drawing Process – a Review. International Journal for Innovative Research in Science e Technology. Vol. 3. p 103 – 106. 2017.

DUTRA, J.C. Textura e relações de orientação: deformação plástica, recristalização, crescimento de grão EPUSP: SP; p.21, 2001.

ERICHSEN, A.M. A new test for thin sheets. Stahl und Eisen 34:879–882 (in German), 1914.

FARIA, Alfredo F. de. REGO, Ronnie. ITA, MT-717: Introdução a Materiais e Processos de Fabricação 2019.

FERREIRA, R.S. Conformação Plástica Fundamentos Metalúrgicos e Mecânicos. 2ª ed. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2010.

FERREIRA, Sérgio José. Efeito da Fração Volumétrica de Martensita, Formada no Resfriamento Após Recozimento Intercrítico, no Grau de Estriamento, Propriedades Mecânicas e Estampabilidade de um Aço Tipo AISI 430. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG. Belo Horizonte, 2005.

FILHO Bresciani, Zavaglia, C. A. C. ; Button, S. T.; Gomes, E.; Nery, Fernando A. C., Conformação Plástica dos Metais, Editora da Unicamp, 4ª edição, 1997.

FILHO, E. B.; ZAVAGLIA, C. A. C.; BUTTON, S. T.; GOMES E.; NERY, F. A. C. Conformação Plástica dos Metais. Campinas-SP: Editora da Unicamp, 1991.

GAO F, CHEN Y, ZHU Q, NAN Y, TANG S, CAI Z, ZHANG F, XUE W, CAI X, YU F, LIU Z. Formation of recrystallization texture and its effect on deep drawability for high-purified ferritic stainless steel by two step cold rolling. *Materials & Design*. 226: 111679, 2023.

GAO F, Liu Z, Liu H, Wang G. Texture evolution and formability under different hot rolling conditions in ultra purified 17%Cr ferritic stainless steels. 2013.

GARCIA, Amauri. *Ensaaios dos Materiais*. 2. Rio de Janeiro LTC, 2012.

GARCIA, A., SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. *Ensaaios de Materiais*. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S. A., 2000.

GHOSH, A.K. The effect of lateral drawing-in on stretch formability. *Metals Engineering Quarterly* 15:53–64, 1975.

GOODWIN, G. M. Application of the Strain Analysis to Sheet Metal Forming in the Press shop. *La Metallurgia Italiana*, v. 8, p. 767-774, 1968.

GRONOSTAJSKI, J. e DOLNY, A. Determination of Forming Limit Curves by Means of Marciniak Punch, *Memoires Scientifiques Rev.Met.*, p.570-578, Apr. 1980.

GROOVE, M.P. *Introdução aos Processos de Fabricação*. Grupo GEN, 2014.

HE, W.L., MENG, B., SONG, B.Y., WAN, M. Grain size effect on cyclic deformation behavior and springback prediction of Ni-based superalloy foil. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 32: 1118-1204, 2022.

HECKER, S.S. A cup test for assessing stretchability. *Metals Engineering Quarterly* 14:30–36. 1974

HOLMBERG, S.A et al. Evaluation of Sheet Metal Formability by Tensile Tests, Department of Structural Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2003.

HOSFORD, W.F.; CADDELL, R.M. Metal Forming - Mechanics and Metallurgy, Cambridge University Press, 4ª edição , p.327, 2011.

JACOBS,L.J.M; ATZEMA,E.H; MOERMAN,J; ROOIJ,M.B. Quantification of the influence of anisotropic plastic yielding on cold rolling force. Chair of Surface Technology & Tribology, Department of Mechanics of Solids, Surfaces & Systems (MS3), Faculty of Engineering Technology, University of Twente, 7500 AE Enschede, the Netherlands. Elsevier, June 2023.

JOVIGNOT, C . Method and testing device for the study the fracture of the sheet Metals (in French). Revue de Metallurgie 27:287–291, 1930.

JUUTI, T.; MANNIEN, T.; UUSIKALIO, S.; KOMI, J.; PORTER, D. New ferritic stainless steel for service temperature up to 1050°C utilizing intermetallic phase transformation. Metals, 9, 664:1-11, 2019.

K. Chung e R.H Wagoner. Effect of Stress-Strain-Law Transients on Formability. Metallurgical Transactions, v.17^a, p 1001-1009, June, 1986.

KAFTANOGLU, B. ALEXANDER, J.M. An investigation of the Erichsen test. Journal of the Institute of Metals 90:457–470, 1961-62

KAYSELER, H. On the proprieties of sheet steels. Mitt. Forsch. 2:39–42 (in German), 1934.

KEELER, S. P. Determination of the Forming Limits in Automotive Stamping. Sheet Metal Industries, v. 42, p. 683-691, 1965.

KIKUMA T, Nakazima K. Aspects of Deforming Conditions and Mechanical Properties in the Stretch Forming Limits of Sheet Metals. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan 11: p. 827–830, 1971.

KOKKONEN, V; HYGREN, G. Investigation into the accuracy of the Erichsen cupping test. Sheet Metal Industries 36:167–178, 1959.

LABIAPARI, Willian da Silva. Influência de Diferentes Tipos de Acabamentos e Lubrificantes na Estampagem de Aços Inoxidáveis. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. p.23-28;43-53;55;62. (Proposta de dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), 2001.

LANGE, K. Forming Handbook. New York: Mcgraw Hill and SME, 1993.

LANKFORD, W.T., Snyder, S.C., Bauscher, J., 1950. New criteria for predicting the press performance of deep drawing sheets. Trans. ASM 42, 1197–1225. Li, L., Matsumoto, R., Utsunomiya, H. Experimental study of roll flattening, 2018.

LEU, D. K.; CHEN, T. C.; HUANG, Y. M. Influence of punch shapes on the collardrawing process of sheet steel. Journal of Materials Processing Technology, v. 88, n. 1, p. 134–146, 1999.

LIU, H.; LI, H.; LIU, C.; WU, J. Effect of rolling reduction on microstructure and formability of a ferritic stainless steel. ASM International. Journal of Materials Engineering and Performance, 10, 1-10, 2023.

LOBÃO, Maurício. C. Determinação de Curvas Limite de Conformação por Procedimentos Experimentais e Simulação Numérica do Processo de Estampagem.2003.133f. Dissertação (mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina , Centro Tecnológico, Florianópolis, 2003.

LOPES, Wellington. Efeito da Pré-Deformação e Direção de Solicitação no Comportamento Mecânico do Aço Inoxidável AISI 430E com Uso do Ensaio de Cisalhamento para Alterar a Trajetória de Deformação. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

LUNDGREN, Alexandre. B. Análise do Processo de Estampagem de Chapas de Aço Através da Curva Limite de Conformação. 2009. 148f. Dissertação (mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2009.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.L.; HU, S.J. Mechanics of Sheet Metal Forming. Butterworth-Heinemann, 2002.

MARCONDES, P.V.P. Conformação de Chapas Metálicas, 2003.

MESQUITA, Alvares. Estampagem dos Aços Inoxidáveis. p.24-35, 1997

MOREIRA, L. P.; SAMPAIO, A. P.; FERRON, G.; LACERDA, A. C. Análise Numérica e Experimentação da Influência da Espessura Inicial nas Deformações Limites em Chapas. VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 39-49, 2003.

MOURAO, M.B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; LEANDRO, C.A.daS.; TAKANO, C.; QUITES, E. E. C.; GENTILE, E. F.; SILVA, G. F. L. e; BOLOTA, J. R.; GONÇALVES, M.; FACO, R. J. Introdução a Siderurgia. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

OLIVEIRA, T.R.; SILVA, R.C.R.; ALCÂNTARA, C.M; LOPES, R.G.; FERREIRA, J.S.; ARTHUSO, E.M.; COIMBRA, D.L.; MACHADO, V.C.; GUIDA, R.B; MARTINS, S.R. Aço inoxidável ferrítico tipo ASTM 430 para estampagem profunda, com alto brilho e isento de estriamento. 68º Congresso Anual da ABM, p. 2240-2250, 2003.

OLSEN, T.Y. Machines for ductility testing. Proceedings of the American Society for Testing and Materials 20:398–403, 1920.

NAKAZIMA, K.; KIKUMA, T.; HASUKA, K. Study on Formability of Steel Sheets. Yawata Tech. Rep. n. 264, p. 141, 1968.

NARASHIMHAN, K. NANDEDKAR, V.M. Formability testing of sheet metals. Transactions of the Indian Institute of Metals 49:659–676, 1996

PEARCE, R. 4000 Years of sheet metal forming. In: Newby JR, Niemeier BA (eds) Formability of metallic materials 2000 AD, ASTM, Chicago, 3–18, 1982.

PENEDO, Rafael Lopes Filho. Microestrutura, Textura e Propriedades de Estampagem de Aços Inoxidáveis Ferríticos Estabilizados ao Titânio e ao Nióbio após Processos de Laminação a Quente, a Frio e Recozimento. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional. Belo Horizonte, 2023.

PEREIRA, R. B. Estudo da Estampabilidade de Chapas de Aço na Indústria Automobilística Utilizando a Tecnologia de Tailored blanks. 2005.150f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

QIAN, J.; CHEN, C.; YU, H.; LIU, F.; YANG, H.; ZHANG, Z. The influence and the mechanism of the precipitate/austenite interfacial C- enrichment on the intergranular corrosion sensitivity in 310 S stainless steel. Corrosion Science, v.111 p. 252-361, 2016.

RAUCH, E.F. The Flow Law of Mild Steel Under Monotonic or Complex Strain Path. Solid State Phenomena, v. 23-24, p 317-334, 1992.

REED-HILL, R.E. Princípios de Metalurgia Física Guanabara Dois: RJ. 2ª. ed., p. 10, 1982.

RICHTER, A. Comparação dos Resultados de Diferentes Testes Para a Determinação da Curva Limite de Conformação. VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 24-29, 2003.

ROCHA, Marcio Roberto da. Estudo da Conformabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos 304N e 304H e Suas Correlações com as microestruturas obtidas. 2006. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. Tecnologia Mecânica. [S.I.]: Escolar, 2005.

RODRIGUES, DG., Alcântara CM De, Oliveira TR De, Gonzalez BM. The effect of grain size and initial texture on microstructure, texture, and formability of Nb stabilized ferritic stainless steel manufactured by two-step cold rolling. J Mater Res Technol, 2019.

SCHAEFFER, L. NUNES, R M., BRITO, A. M. G. Tecnologia da Estampagem de Chapas Metálicas. Ed. Imprensa Live. Porto Alegre, 2017.

SCHMIDOVÁ, E., KLEJCH, F., SUNILKUMAR, M.R. Development of anisotropy and strain hardening in damaged stamped parts made of IF steel, Engineering Failure Analysis, v. 145, 107015, 2023.

SCHULER, Springer , Metals Handbook (ed.). Forming and Forging. 14. ed. ASM International, 1993.

SIEBEL, E; POMP, A. A new test for thin sheets. Mitt. K.W.I. 11:287–291 (in German), 1929.

SILVA, Thiago Augusto. Estudo do limite de embutimento da liga de magnésio AZ31B em temperaturas variadas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação PUC-Minas. Belo Horizonte, 2018.

SOUZA. S.A. Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. 5a ed, 2014.

SUWAS S, Ray RK. Crystallographic Texture of Materials. 2014.

TAN, C.J., MORI, K., ABE, Y. Forming of tailor blanks having local thickening for control of wall thickness of stamped products. Journal of Materials Processing Technology, v. 202, p. 443 – 449, 2008

TIWARI, P. R., RATHORE, A., BODKHE, M. G. Factors Affecting the Deep Drawing Process – a Review. Material Today: Proceedings. Vol. 56. p. 2902 – 2908. 2022.

WINNING M, ROLLET AD. Transition between low and high angle grain boundaries. Acta Mater. 53: 2901-7, 2005.

WOODTHORPE, J., PEARCE, R. The Effect of Random Upon the Forming Limit Diagrams of Sheet Metal. Sheet Metal Industries. p. 1061 – 1067, 1969

YOKAI, M. ALEXANDER, J.M. A further investigation of the Erichsen test. Sheet Metal Industries 44:466–475, 1967.

YOSHIDA K. Classification and Systematization of Sheet-Metal Press-Forming Process. Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research 53, 1959.