

**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais**



**Dissertação de Mestrado**

**JOÃO MARCOS DO CARMO ANTUNES**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ESTRUTURAL DO AÇO INOXIDÁVEL AISI  
444 APÓS UMA OPERAÇÃO DE ESTAMPAGEM**

**Belo Horizonte**

**2025**

João Marcos do Carmo Antunes

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ESTRUTURAL DO AÇO INOXIDÁVEL AISI  
444 APÓS UMA OPERAÇÃO DE ESTAMPAGEM**

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 a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

Coorientadora: Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Belo Horizonte

2025

Antunes, João Marcos do Carmo.  
A636c      Caracterização mecânica e estrutural do aço inoxidável AISI 444  
após uma operação de estampagem / João Marcos do Carmo  
Antunes. – 2025.  
119 f. : il.  
Orientador: Wellington Lopes.  
Coorientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa.  
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2025.  
Bibliografia.  
1. Estampagem profunda (Metalurgia). 2. Aço inoxidável ferrítico.  
3. Dureza Vickers. 4. Anisotropia. 5. Elétrons - Difração. I. Lopes,  
Wellington. II. Corrêa, Elaine Carballo Siqueira. III. Título.  
CDD: 620.1123



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 8 / 2025 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.021782/2025-58

Belo Horizonte-MG, 24 de abril de 2025.

*DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*

*CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ESTRUTURAL DO AÇO AISI 444 APÓS  
UMA OPERAÇÃO DE ESTAMPAGEM*

Autor: João Marcos do Carmo Antunes

Orientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 24 de abril de 2024 esta Dissertação:

Prof. Dr. Wellington Lopes (ORIENTADOR)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elaine Carballo Siqueira Corrêa (COORIENTADORA)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra (EXAMINADOR INTERNO)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva (EXAMINADOR EXTERNO)  
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUCMinas

(Assinado digitalmente em 25/04/2025 08:27 )  
AUGUSTO CESAR DA SILVA BEZERRA  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DET (11.55.11)  
Matrícula: 2506476

(Assinado digitalmente em 24/04/2025 15:14 )  
ELAINE CARBALLO SIQUEIRA CORREA  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DEMAT (11.55.06)  
Matrícula: 2506564

(Assinado digitalmente em 24/04/2025 15:18 )  
WELLINGTON LOPES  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DEMAT (11.55.06)  
Matrícula: 2579287

(Assinado digitalmente em 25/04/2025 16:39 )  
GILMAR CORDEIRO DA SILVA  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: ###.###.776-##

“A gravidade explica os movimentos dos planetas, mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento. Deus governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito.”

*Isaac Newton*

## **Agradecimentos**

Primeiramente a Deus, que sempre foi meu apoio me dando sabedoria guiando meus passos, me fortalecendo sempre para superar momentos difíceis.

Aos meus pais que sempre me mostraram o certo a fazer mostrando que acima de tudo a honestidade e sinceridade deve prevalecer, agradeço o incentivo e apoio nas minhas decisões e compreensão nos momentos de dificuldade, a minha irmã que sempre acreditou no meu potencial e determinação.

A minha esposa Miriã Moreira pela compreensão, companheirismo, pelo apoio incomparável neste período sempre me incentivando.

Ao Prof. Dr. Wellington Lopes, expresso minha profunda gratidão pela orientação, pela confiança transmitida ao longo de todo o processo, pela dedicação constante no acompanhamento e apoio no desenvolvimento dos trabalhos, bem como pela disponibilidade em auxiliar sempre que necessário para que nossos objetivos fossem alcançados. Agradeço também pela amizade e parceria ao longo dessa jornada. Meu muito obrigado.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus amigos e colegas de mestrado, Jeferson Ferreira, Thiago de Carvalho e Flaudilenio Eduardo. A jornada acadêmica se tornou muito mais rica e significativa graças à parceria e ao apoio de vocês. A colaboração, as discussões e o incentivo constantes foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios do mestrado com mais confiança e motivação, sou extremamente grato por ter vocês ao meu lado nessa jornada.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio, fundamental para a realização desta pesquisa. O incentivo à formação acadêmica e à produção científica proporcionado por esta instituição foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

A todas as pessoas que mesmo não mencionadas aqui contribuíram para a conclusão deste trabalho de pesquisa.

## RESUMO

A obtenção de componentes de qualidade no setor metalmeccânico requer a otimização das etapas de conformação, incluindo a escolha adequada dos materiais e das condições de processamento aplicadas. Nesse contexto, o uso de aços inoxidáveis, como o AISI 444, em dispositivos da indústria automotiva ainda é recente, especialmente em operações de estampagem profunda. Este trabalho avaliou o comportamento do aço inoxidável ferrítico AISI 444 submetido à estampagem profunda por embutimento para obtenção de copos sem aba. O objetivo foi analisar as respostas mecânica e estrutural desse aço inoxidável ferrítico, visando ampliar o conhecimento das variáveis que afetam a conformabilidade desse aço, amplificando assim, seu uso na indústria. Em termos de caracterização mecânica foram realizados ensaios de microtração e microdureza Vickers em diferentes regiões do produto estampado, além da análise da distribuição da deformação plástica por meio do traçado de malhas de círculos. A evolução estrutural do aço AISI 444 também foi estudada por meio da técnica de difração de elétrons retroespalhados (EBSD) e microscopia óptica (MO). Os resultados demonstraram que a distribuição da dureza Vickers foi coerente com evolução microestrutural do aço AISI 444, em termos do alongamento dos grãos detectado principalmente na região da lateral e próximo à borda dos copos, sendo percebida ainda a formação de textura preferencial no plano (111). A variação do raio do punção não influenciou de modo relevante as propriedades mecânicas e o arranjo estrutural assumidos pelo aço AISI 444 após a estampagem, não afetando a estampabilidade desse material que exibiu parâmetro LDR igual a 2,35.

Palavras-chave: Estampagem profunda, Aço inoxidável AISI 444, Microdureza Vickers, Anisotropia, Microtração, EBSD.

## **ABSTRACT**

The production of high-quality components in the metal-mechanical sector requires the optimization of forming processes, including the appropriate selection of materials and processing conditions. In this context, the use of stainless steels such as AISI 444 in automotive industry components is still relatively recent, especially in deep drawing operations. This study evaluated the behavior of ferritic stainless steel AISI 444 subjected to deep drawing by cupping, aiming to produce cups without flanges. The objective was to analyze the mechanical and structural responses of this ferritic stainless steel, with the goal of expanding the understanding of the variables that affect its formability and, consequently, broadening its applicability in industry.

Mechanical characterization involved microtensile and Vickers microhardness tests performed on different regions of the drawn component, in addition to the analysis of plastic strain distribution using a circle grid method. The structural evolution of AISI 444 was investigated through electron backscatter diffraction (EBSD) and optical microscopy (OM). The results showed that the Vickers hardness distribution was consistent with the microstructural evolution of AISI 444, particularly the grain elongation observed in the sidewall and near the rim of the cups. Preferential texture formation in the (111) plane was also identified. The variation in punch radius did not significantly influence the mechanical properties or the structural arrangement of the AISI 444 steel after drawing, and it did not compromise the formability of the material, which exhibited a limiting drawing ratio (LDR) of 2.35.

**Keywords:** Deep drawing, AISI 444 stainless steel, Vickers microhardness, Anisotropy, Microtensile testing, EBSD.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Ligações de composição e propriedades na família de ligas de aços inoxidáveis.....                                                   | 22 |
| Figura 2 - Fotomicrografia típica de um aço AISI 444 laminada a frio com 60% e recozido a 955 °C.....                                           | 26 |
| Figura 3 - Diagrama de equilíbrio Fe-Cr.....                                                                                                    | 28 |
| Figura 4 - Diagrama de transformação isotérmica para o aço AISI 410.....                                                                        | 29 |
| Figura 5 - Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico.....                                                                          | 30 |
| Figura 6 – Esquema do processo de corte cisalhamento.....                                                                                       | 31 |
| Figura 7 - Esquema do processo de dobramento. ....                                                                                              | 32 |
| Figura 8 – Esquema do processo de estiramento.....                                                                                              | 32 |
| Figura 9 - <i>Limited Drawing Ration (LDR)</i> . ....                                                                                           | 33 |
| Figura 10 - Comparação de LDR de alguns aços inoxidáveis.....                                                                                   | 34 |
| Figura 11 – Esquema do processo de embutimento.....                                                                                             | 34 |
| Figura 12 – Variação da espessura da chapa de acordo com a região no repuxo do material AISI 304 recozido com espessura inicial de 0.057”. .... | 35 |
| Figura 13 - CLC obtida pelo método de Nakajima.....                                                                                             | 36 |
| Figura 14 - Curvas de limite de conformação.....                                                                                                | 37 |
| Figura 15 - Resultado das gravações dos círculos no corpo de prova.....                                                                         | 38 |
| Figura 16 - Determinação de $\epsilon_1$ e $\epsilon_2$ por meio das diagonais a e b das elipses. Tipos de deformações existentes.....          | 41 |
| Figura 17 - Curva limite de conformabilidade (CLC) do AISI 1008.....                                                                            | 41 |
| Figura 18 - Perfis de distribuição das deformações obtidas no estiramento, com e sem lubrificação do punção .....                               | 45 |
| Figura 19 - Curva-limite de conformação obtida para o aço inox 304N, com lubrificante de poliuretano.....                                       | 45 |
| Figura 20 - Curva-limite de conformação obtida para o aço inox 304N, com lubrificante mineral .....                                             | 46 |
| Figura 21 - Diagrama comparativo das curvas obtidas utilizando o lubrificante de óleo mineral e o de poliuretano.....                           | 47 |
| Figura 22 - Imagens obtidas por microscopia óptica da chapa laminada.....                                                                       | 49 |
| Figura 23 - Microestrutura de chapas laminadas a frio e recozidas correspondentes com vários graus de reduções de laminação a frio. ....        | 49 |

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 24 - Copo trefilado profundo de grau AISI 430 mostrando o fenômeno “roping”.                                                          | 51 |
| Figura 25 - Representação das principais direções avaliadas para o cálculo da anisotropia plástica.                                          | 54 |
| Figura 26 - variação da resistência ao escoamento ( $\Delta\sigma$ ) em função da deformação prévia                                          | 56 |
| Figura 27 - Diagrama esquemático tensão-deformação em tração mostrando os fenômenos de recuperação da deformação elástica e de encruamento.  | 57 |
| Figura 28 - Geometria do punção e raios de congruência de cada ferramenta – diâmetro de 100 mm                                               | 59 |
| Figura 29 - Comparação de deformação real (FLC) de acordo com Nakazima                                                                       | 60 |
| Figura 30 - Distribuição da espessura do material simulado (aço de baixo carbono) com diversos valores do raio do punção ( $r_p$ , mm).      | 62 |
| Figura 31 - Variação do afinamento da chapa em simulação (aço de baixo carbono) com diferentes valores do raio do punção ( $r_p$ )           | 63 |
| Figura 32 - Microestrutura inicial do espécime produzido pelo recozimento da chapa de aço inoxidável 436L laminada a frio conforme recebida. | 65 |
| Figura 33 - Figuras de polo das amostras recozidas do aço inoxidável AISI 430                                                                | 66 |
| Figura 34 - Mapa de orientação (IPF) da projeção Z da superfície da amostra                                                                  | 67 |
| Figura 35 - Fluxograma representativo do procedimento experimental realizado                                                                 | 69 |
| Figura 36 - Desenho técnico do corpo de prova adotado para os ensaios de tração.                                                             | 69 |
| Figura 37 - Indicação das regiões do copo embutido onde foi realizada a medição da dureza Vickers.                                           | 71 |
| Figura 38 - Representação do corpo de prova estampado com as respectivas regiões de análise da microestrutura.                               | 72 |
| Figura 39 - Corpo de prova (Blank) após gravação da malha de referência.                                                                     | 74 |
| Figura 40 - Desenho do punção usado para realização da estampagem.                                                                           | 74 |
| Figura 41 - Matriz usada nos testes de estampagem.                                                                                           | 75 |
| Figura 42 - Corpo de prova com a formação de elipses após conformação                                                                        | 76 |
| Figura 43 - Medição da profundidade interna do blank estampado                                                                               | 77 |
| Figura 44 – Corpo de prova micro tração após estampagem                                                                                      | 78 |
| Figura 45 - Regiões onde foram retiradas as amostras para microdureza Vickers.                                                               | 78 |
| Figura 46 - Gráfico tensão x deformação do AISI 444 (Conforme recebido).                                                                     | 79 |

|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 47 - Microestrutura AISI 444, como recebido. ....                                                                                          | 82  |
| Figura 48 - Copos estampados, com diâmetros de blank variados e raio de punção 7 mm. ....                                                         | 83  |
| Figura 49 - Copos estampados, com diâmetros de blank variados e raio de punção 8 mm. ....                                                         | 84  |
| Figura 50 - Região com maior deformação da malha após a conformação .....                                                                         | 86  |
| Figura 51 - Blanks com diâmetro inicial de 62mm fraturado .....                                                                                   | 88  |
| Figura 52 - Curva limite de conformação .....                                                                                                     | 89  |
| Figura 53 - Curvas tensão convencional-deslocamento transversal dos copos estampados para diferentes valores de blank e raio punção. ....         | 90  |
| Figura 54 - Imagens da marcação após ensaio de microdureza Vickers no aço .....                                                                   | 91  |
| Figura 55 - Perfil de dureza Vickers por região dos copos estampados em função da posição do copo, do diâmetro do blank e do raio do punção. .... | 93  |
| Figura 56 - Gráfico de dispersão da dureza Vickers em função da posição do copo, do diâmetro do blank e do raio do punção. ....                   | 93  |
| Figura 57 - posições do copo onde foi analisada a microestrutura. ....                                                                            | 94  |
| Figura 58 - Microestrutura AISI 444 da região da aba com raio de punção 7mm e 8 mm, Ampliação de 100x Blank de 60mm: .....                        | 95  |
| Figura 59 - Microestrutura AISI 444 da região lateral com raio de punção 7mm e 8 mm, Ampliação de 100x Blank de 60mm: .....                       | 96  |
| Figura 60 - Microestrutura AISI 444 da região do raio com raio de punção 7mm e 8 mm, Ampliação de 100x Blank de 60mm: .....                       | 97  |
| Figura 61 - Microestrutura AISI 444 da região do fundo com raio de punção 7mm e 8 mm, Ampliação de 100x Blank de 60mm: .....                      | 98  |
| Figura 62 - Desorientação dos grãos - AISI 444 Conforme recebido. ....                                                                            | 100 |
| Figura 63 - Desorientação dos grãos - AISI 444, lateral do copo estampado com blank de 60mm e punção com raio de 7mm. ....                        | 100 |
| Figura 64 - Desorientação dos grãos - AISI 444, lateral do copo estampado com blank de 60mm e punção com raio de 8mm. ....                        | 100 |
| Figura 65 - Figura de polo - Fase ferrita – AISI 444 Como recebido. ....                                                                          | 102 |
| Figura 66 - Figura de polo - Fase ferrita - AISI 444 após estampagem (D60-R7)...                                                                  | 103 |
| Figura 67 - Figura de polo - Fase ferrita - AISI 444 após estampagem (D60-R8)...                                                                  | 103 |
| Figura 68 - Mapa de desorientação dos grãos - Ângulo entre $X=0$ $Y=0$ $Z=1$ e direções [111]. ....                                               | 105 |

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 69 - Fator de Taylor (D60R7 - D60R8 - Conforme recebido). ..... | 109 |
|------------------------------------------------------------------------|-----|

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Características e associações de cada quadrante .....                                                                                          | 40  |
| Tabela 2 - Adequação de vários lubrificantes para uso na conformação de aço inoxidável (A - excelente; B - bom; C - aceitável; NR - não recomendado)..... | 44  |
| Tabela 3 - Efeito do raio do punção (rp) na distribuição da espessura da chapa simulada (aço de baixo carbono). ....                                      | 63  |
| Tabela 4 - Composição química do aço AISI 444 (% em peso) .....                                                                                           | 68  |
| Tabela 5 - Resumo das propriedades mecânicas do aço AISI 444 recebido. ....                                                                               | 79  |
| Tabela 6 – Fatores de anisotropia para o aço AISI 444 recebido.....                                                                                       | 80  |
| Tabela 7 - Dureza Vickers AISI 444 .....                                                                                                                  | 81  |
| Tabela 8 - Profundidade interna e carga máxima dos blanks conformados .....                                                                               | 84  |
| Tabela 9 - Variação da espessura ao longo do copo após conformação .....                                                                                  | 87  |
| Tabela 10 - Propriedades mecânicas após ensaio de microtração (limite de resistência e percentual de alongamento).....                                    | 90  |
| Tabela 11 - Regiões de análise para obtenção de micro dureza Vickers (D55R7 e D60R7).....                                                                 | 91  |
| Tabela 12 - Regiões de análise para obtenção de micro dureza Vickers (D55R8 e D60R8).....                                                                 | 92  |
| Tabela 13 - Ângulos analisados entre X=0 Y=0 Z=1 e direções [111] (Todas as fases) - (D60R7 - D60R8 - Conforme recebido).....                             | 106 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|              |                                                 |
|--------------|-------------------------------------------------|
| AU           | : Alongamento uniforme                          |
| °C           | : grau centígrado                               |
| Fe           | : Ferro                                         |
| mm           | : milímetro                                     |
| Cr           | : cromo                                         |
| Ni           | : níquel                                        |
| Mo           | : molibdênio                                    |
| %            | : por cento                                     |
| C            | : carbono                                       |
| Mn           | : manganês                                      |
| Si           | : silício                                       |
| PM           | : Metalurgia do pó                              |
| CCC          | : Cúbica de corpo centrado                      |
| CFC          | : Cúbica de face centrada                       |
| TCC          | : Tetragonal de corpo centrado                  |
| N            | : Nitrogênio                                    |
| Cu           | : Cobre                                         |
| HRC          | : Rockwell C                                    |
| Nb           | : Nióbio                                        |
| LE           | : Limite de Escoamento                          |
| LDR          | : <i>Limited Drawing Ration</i>                 |
| CLC          | : Curvas de Limite de Conformação               |
| LE           | : Limite de escoamento                          |
| LR           | : Limite à tração                               |
| LTR          | : Limite de resistência a tração                |
| $\bar{R}$    | : Coeficiente de anisotropia normal médio       |
| R            | : Coeficiente de anisotropia plástica           |
| $\epsilon_w$ | : Deformação verdadeira na direção da largura   |
| $\epsilon_t$ | : Deformação verdadeira na direção da espessura |
| $w_0$        | : Largura inicial do corpo de prova             |
| $w_f$        | : Largura final do corpo de prova               |

|                 |                                         |
|-----------------|-----------------------------------------|
| $l_0$           | : Comprimento inicial do corpo de prova |
| $\varepsilon_0$ | : Deformação no comprimento             |
| SL              | : Sentido de laminação                  |
| HV              | : Dureza vickers                        |
| gf              | : Grama força                           |
| $\varepsilon_0$ | : Deformação no comprimento             |
| $\varepsilon_1$ | : Deformação maior na curva CLC         |
| $\varepsilon_2$ | : Deformação menor na curva CLC         |

## LISTA DE ABREVIACES E SIGLAS

|      |                                                                                  |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|
| ABNT | :Associao Brasileira de Normas Técnicas.                                      |
| AISI | : <i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e Aço). |
| EBSD | :Difraco de elétrons retroespalhados.                                         |
| CLC  | :Curva limite de conformabilidade                                                |
| IPF  | :Mapa de Orientao da Figura de Polo inverso                                   |
| GBCD | : Mapa de Características das Fronteiras de Grãos                                |
| MO   | : Microscopia ptica                                                             |

## SUMÁRIO

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....                                                             | 18 |
| 2 OBJETIVOS .....                                                              | 20 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                                   | 21 |
| 3.1 Aços inoxidáveis.....                                                      | 21 |
| 3.2 Classificação dos aços inoxidáveis .....                                   | 23 |
| 3.4 Estampagem .....                                                           | 30 |
| 3.4.1 Operações de estampagem .....                                            | 30 |
| 3.5 Curvas limites de conformação (CLC).....                                   | 35 |
| 3.5.1 Fatores que influenciam na obtenção da curva limite de conformação ..... | 42 |
| 3.6 Lubrificação .....                                                         | 43 |
| 3.7 Fatores que afetam a estampabilidade dos aços .....                        | 47 |
| 3.7.1 Formação de textura .....                                                | 47 |
| 3.7.2 Anisotropia .....                                                        | 51 |
| 3.7.3 Encruamento .....                                                        | 55 |
| 3.7.4 Raio e formato do punção .....                                           | 58 |
| 3.8 Textura .....                                                              | 64 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS.....                                                    | 68 |
| 4.1 Material.....                                                              | 68 |
| 4.2 Fluxograma .....                                                           | 68 |
| 4.3 Caracterização Mecânica .....                                              | 69 |
| 4.3.1 Ensaio de tração .....                                                   | 69 |
| 4.3.2 Microdureza Vickers .....                                                | 70 |
| 4.4 Caracterização Estrutural.....                                             | 71 |
| 4.4.1 Microscopia óptica.....                                                  | 71 |
| 4.4.2 Difração por elétrons retroespalhados (EBSD) .....                       | 72 |
| 4.5 Estampagem .....                                                           | 73 |
| 5 RESULTADO E DISCUSSÃO .....                                                  | 79 |
| 5.1 Caracterização mecânica antes da conformação.....                          | 79 |
| 5.1.1 Ensaio de tração .....                                                   | 79 |
| 5.1.2 Avaliação da dureza .....                                                | 81 |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2 Caracterização microestrutural antes da deformação .....        | 81  |
| 5.2.1 Microestrutura .....                                          | 81  |
| 5.2.2 Tamanho de grão .....                                         | 82  |
| 5.3 Caracterização mecânica do aço AISI 444 após a estampagem ..... | 83  |
| 5.3.1 Conformação por estampagem .....                              | 83  |
| 5.3.2 Limite de deformação .....                                    | 88  |
| 5.3.3 Ensaio de microtração .....                                   | 89  |
| 5.3.4 Ensaio de dureza .....                                        | 91  |
| 5.4 Caracterização microestrutural após a estampagem .....          | 94  |
| 5.4.1 Análise microestrutural .....                                 | 94  |
| 5.4.2 Análise por Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD) ..... | 98  |
| 5.4.2.1 Desorientação dos grãos .....                               | 99  |
| 5.4.2.2 Textura .....                                               | 101 |
| 6 Conclusões .....                                                  | 110 |
| RERFERÊNCIAS .....                                                  | 111 |

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda da engenharia por componentes metálicos com geometrias complexas e propriedades específicas tem impulsionado a modernização contínua dos processos de conformação, especialmente no que se refere à laminação e aos tratamentos térmicos de chapas metálicas com espessuras reduzidas e baixo custo de fabricação. As propriedades mecânicas desses materiais permitem a produção de peças leves e resistentes por meio de diversas técnicas de estampagem (MARCINIAK; DUNCAN; HU, 2002).

Entre essas técnicas, a estampagem profunda destaca-se como um dos processos mais utilizados na transformação de chapas metálicas em componentes funcionais, especialmente em aplicações automotivas e industriais. Nesse processo, uma chapa metálica é forçada por um punção contra uma matriz com geometria definida, resultando em peças tridimensionais conforme as especificações de projeto.

Dentre os materiais empregados na estampagem, os aços inoxidáveis têm ganhado destaque devido à sua excelente resistência à corrosão e à boa resistência mecânica, sendo aplicados em sistemas de exaustão automotivos, painéis de elevadores, caldeiras, tanques de água e eletrodomésticos. O aço inoxidável ferrítico AISI 444, em particular, combina alta resistência à corrosão, boa soldabilidade, estabilidade térmica e baixo custo, por conter menor teor de níquel. Essas características tornam o AISI 444 uma alternativa promissora aos aços inoxidáveis austeníticos em diversas aplicações industriais (ISSF, 2007).

As propriedades mecânicas de um material, incluindo resistência mecânica, ductilidade e tenacidade, são determinantes para sua conformabilidade, ou seja, sua capacidade de ser moldado sem falhas durante o processo de estampagem. Materiais com alta conformabilidade são essenciais para evitar o aparecimento de defeitos durante a fabricação ou uso de produtos conformados, tais como rachaduras e deformações indesejadas. Além disso, a textura e a microestrutura influenciam diretamente a qualidade do produto final; pois uma textura otimizada pode contribuir para o aumento da resistência à deformação e a durabilidade de um componente, assegurando seu desempenho funcional (ABREU, 2006).

Apesar dessas vantagens, ainda existem lacunas significativas no conhecimento técnico sobre o comportamento mecânico e estrutural do AISI 444 em processos de conformação plástica, especialmente na estampagem profunda. Parte dessa deficiência está associada à falta de dados sistemáticos sobre sua resposta mecânica, distribuição de deformações, e evolução microestrutural e textural ao longo do processo, o que limita seu uso mais amplo na indústria. Além disso, a crescente demanda por materiais mais econômicos e sustentáveis tem impulsionado o interesse por aços inoxidáveis ferríticos, como o AISI 444, que oferecem uma combinação de desempenho técnico e custo competitivo. Essas características reforçam seu potencial como alternativa aos aços inoxidáveis austeníticos.

Diante desse cenário, este trabalho investiga as propriedades mecânicas e estruturais do aço inoxidável ferrítico AISI 444 submetido ao processo de estampagem profunda. Neste caso, são analisadas propriedades mecânicas e microestruturais em diferentes regiões do copo estampado, bem como a influência de distintos diâmetros de blank na conformabilidade desse material. Apesar do conhecimento prévio de que o raio do punção não tende a promover mudanças significativas nas propriedades mecânica de um aço numa operação de estampagem, esse trabalho optou por realizar essa investigação devido à ausência de estudos anteriores que tenham realizado uma avaliação sistemática em termos de caracterização mecânica e estrutural com a mudança do raio do punção. A caracterização mecânica e microestrutural do aço inoxidável AISI 444 mostra-se assim, essencial para a compreensão de seu comportamento frente à estampagem profunda, fornecendo subsídios técnicos para a ampliação de suas aplicações industriais (PADMANABHAN, R et al., 2007).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho foi analisar o comportamento mecânico e estrutural assumidos pelo aço inoxidável AISI 444 após uma operação de estampagem por embutimento.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- a) avaliar as propriedades mecânicas do aço AISI 444 antes e após a estampagem;
- b) analisar a influência do raio do punção na resposta mecânica e orientação cristalográfica do material;
- c) determinar a razão limite de estampagem do aço AISI 444;
- d) obter a curva limite de estampagem do aço AISI 444 por técnicas experimentais;
- e) investigar a formação de textura e sua correlação com os efeitos da deformação plástica.

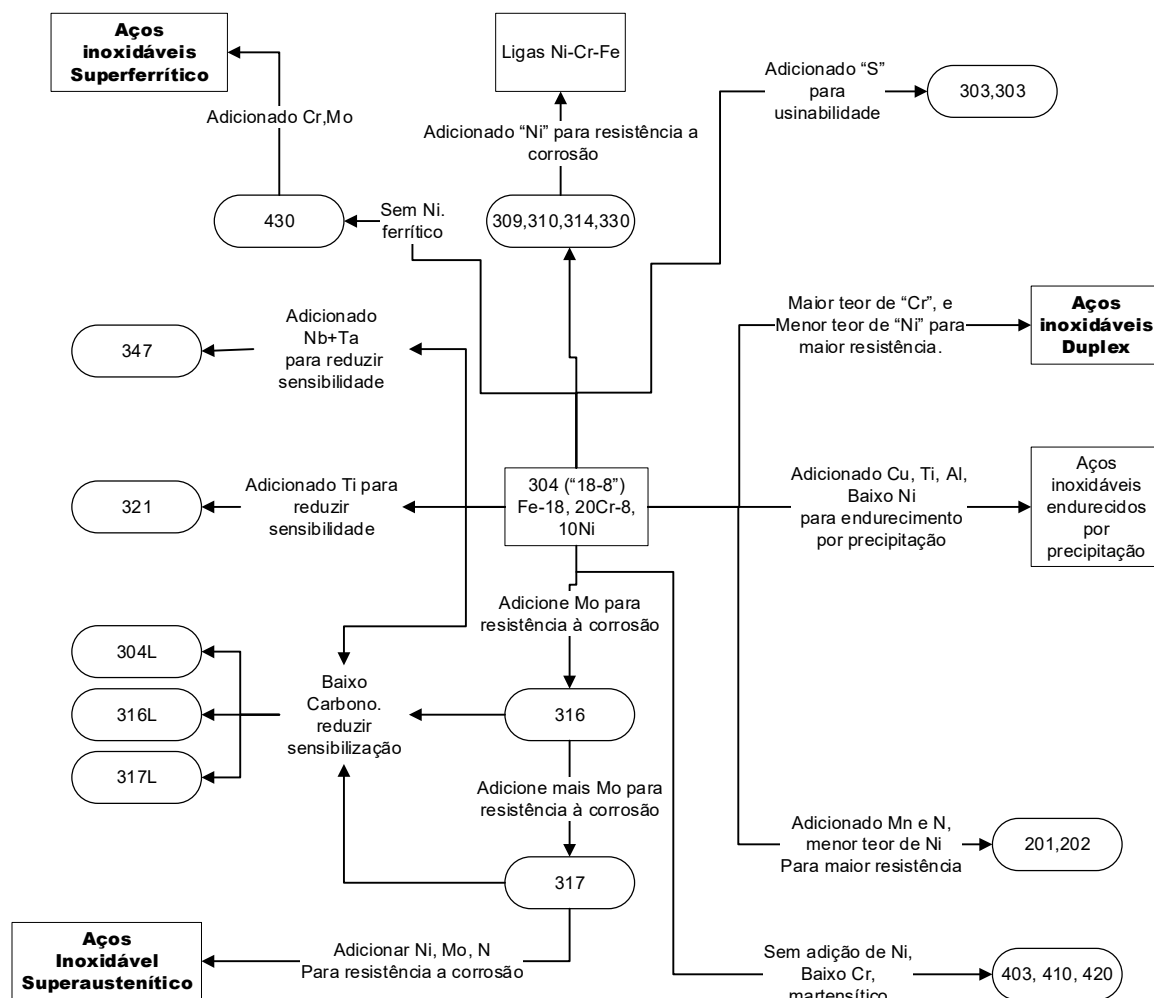
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Aços inoxidáveis

O aço inoxidável é uma liga metálica dotada de inúmeras propriedades vantajosas que podem ser exploradas em diversas aplicações. Sua resistência à corrosão e longa durabilidade permitem a criação de estruturas mais esbeltas e robustas. Além disso, oferece uma ampla gama de possibilidades em termos de geometrias, ao mesmo tempo em que se destaca por sua resistência, versatilidade e capacidade de reciclagem (ROMERO R et al.,2022)

Aço inoxidável é um material que apresenta, no mínimo, 11% de cromo (Cr) em sua composição química, quantidade esta necessária para evitar a deterioração pela ação da corrosão em ambientes com atmosfera normal (daí a designação de inoxidáveis). As características inoxidáveis destes aços ocorrem graças à formação de uma camada fina superficial, invisível, não porosa e aderente de óxido rico em cromo ( $Cr_2O_3$ ). Este óxido se forma na presença de oxigênio, dificultando a interação destes aços com a atmosfera ambiente. Outros elementos adicionados para melhorar características particulares incluem níquel, molibdênio, cobre, titânio, alumínio, silício, nióbio, nitrogênio, enxofre e selênio. Como exemplo, o carbono (C) está normalmente presente em quantidades que variam de menos de 0,03% a mais de 1,0% em certos graus martensíticos. Na figura 1 é fornecido um resumo de algumas das ligações de composição e propriedades na família dos aços inoxidáveis (ASM, 1999; BOCK, 2015).

**Figura 1 - Ligações de composição e propriedades na família de ligas de aços inoxidáveis.**



**Fonte: ASM Specialty Handbook-Stainless Steels, 1999 (Adaptado).**

Os aços inoxidáveis podem ser produzidos e usados na condição fundida; além de também serem utilizadas formas que podem ser produzidas por técnicas de metalurgia do pó (PM), além de produtos planos, como chapas, tiras e placas. O produto laminado plano pode ser conformado posteriormente por diferentes técnicas, como por meio da aplicação de esforços capazes de promover o estiramento, o dobramento e a extrusão. Os aços inoxidáveis também podem ser usados como um revestimento integral em aços carbono ou de baixa liga, bem como em alguns metais não ferrosos e ligas (ASM, 1999).

O aço inoxidável está presente em vários setores da indústria devido às suas propriedades mecânicas, metalúrgicas e físicas. Quando se especifica um aço

inoxidável, o acabamento é um dos aspectos relevantes que devem ser considerados. O acabamento possui uma importante influência em algumas características do material como, por exemplo, na facilidade da limpeza e na resistência à corrosão (CARBÓ, 2008).

### 3.2 Classificação dos aços inoxidáveis

Além do cromo a adição de outros elementos permite formar um vasto conjunto de materiais. Nos aços inoxidáveis existem dois elementos que são extremamente importantes, o Cr, pela sua contribuição na resistência à corrosão, e o níquel (Ni), que tende a proporcionar o aumento na resistência mecânica (CARBÓ, 2008), além de estabilizar a fase austenítica nos aços inoxidáveis austeníticos.

Ainda que existam diferentes classificações quanto às famílias dos aços inoxidáveis, a classificação mais simples é baseada na microestrutura que apresentam a temperatura ambiente. Nessas condições existem três famílias mais conhecidas. Pode-se dividir em princípio, os aços inoxidáveis em dois grandes grupos: a série 400 e a série 300 (CARBÓ, 2008; CHIAVERINI, 2012).

A série 400 compreende os aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos. Os ferríticos possuem estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), são magnéticos e formados essencialmente por ligas de ferro e cromo, caracterizando-se por um teor mais elevado de cromo e baixo conteúdo de carbono. Já os aços martensíticos da mesma série apresentam menor teor de cromo e maior quantidade de carbono em relação aos ferríticos. Por outro lado, as séries 200 e 300 incluem os aços inoxidáveis austeníticos, que são não magnéticos, possuem estrutura cúbica de faces centradas (CFC) e são compostos principalmente por ligas de ferro, cromo e níquel. (CARBÓ, 2008)

**Ferríticos:** Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam teor de Cr na faixa de 10,50% a 30% (em peso), melhorando a resistência à corrosão em detrimento à outras propriedades, como a resistência ao impacto. Estes aços possuem ainda valores de tensão limite de escoamento variando de 275 a 350 MPa (ASM, 1999).

O aço inoxidável ferrítico é caracterizado por não conter elevado teor de níquel, o que o torna mais econômico e estável em comparação com as ligas austeníticas. Ele possui maiores resistências mecânicas na condição de recozimento e apresenta uma resposta de tensão-deformação menos arredondada, com menores razões entre a resistência última e a tensão de escoamento. (BOCK et al., 2015)

Tradicionalmente, os aços inoxidáveis ferríticos eram conhecidos por sua resistência moderada à corrosão e por apresentarem propriedades de fabricação menos robustas. No entanto, surgiram no mercado graus ferríticos de alto desempenho, como exemplo, o AISI 444. Esses materiais podem ser conformados em geometrias mais complexas e unidos tipicamente por soldagem. Um destaque notável desses aços ferríticos é sua resistência à corrosão localizada, que é pelo menos tão boa quanto a do aço inoxidável austenítico AISI 316. Além disso, os aços ferríticos são magnéticos, apresentando menor expansão térmica em comparação com os austeníticos, mas condutividade térmica superior. Isso resulta em uma distribuição mais uniforme do calor durante o uso.

Os aços inoxidáveis ferríticos também se destacam pela facilidade de usinagem e corte, tornando-os mais fáceis de trabalhar em comparação com os aços austeníticos. Além disso, têm uma propensão significativamente menor ao retorno elástico durante a conformação a frio. Esses aços exibem ainda maior resistência ao escoamento em comparação com a maioria dos austeníticos e são menos suscetíveis a trincas por corrosão sob tensão. Vale destacar que é possível aplicar os mesmos acabamentos superficiais tanto aos aços ferríticos quanto aos austeníticos, o que amplia suas opções de uso em diversas aplicações. Esses avanços na qualidade e desempenho dos aços inoxidáveis ferríticos têm ampliado seu leque de aplicações em várias indústrias, onde a resistência à corrosão e a facilidade de processamento são fatores críticos. (BADDON, 2008).

O aço inoxidável ferrítico, de fato, encontrou uma ampla gama de aplicações em diversas áreas devido às suas propriedades e características específicas. São aplicados na fabricação de utensílios de cozinha, na construção civil, transporte e na área petroquímica. Aqui estão algumas das razões pelas quais ele é utilizado em várias indústrias:

**Alta condutividade térmica:** Possui boa condutividade térmica, o que o torna adequado para aplicações em que a dissipação de calor é importante. Isso é particularmente útil em equipamentos de cozinha, como painéis e frigideiras.

**Alto limite de escoamento:** Tem uma resistência mecânica considerável, o que o torna adequado para aplicações em que a força e a durabilidade são necessárias. Ele é frequentemente utilizado na construção de estruturas e componentes resistentes.

**Excelente resistência à corrosão sob tensão:** Essa classe de aço inoxidável é conhecida por sua resistência à corrosão, especialmente em ambientes que contêm íons de cloreto. Portanto, é uma escolha comum em aplicações marítimas e petroquímicas, onde a corrosão é uma preocupação significativa.

**Custo relativamente mais baixo:** O aço inoxidável ferrítico é geralmente mais acessível em comparação com outros tipos de aço inoxidável, como o austenítico.

**Facilidade de fabricação:** É possível fabricar peças de aço inoxidável ferrítico com relativa facilidade, o que o torna uma escolha prática para uma variedade de produtos e componentes (GAO et al., 2023).

As ligas com alto teor de cromo (19 a 30%), conhecidas também como superferríticas, são usadas para resistência extra à corrosão e à oxidação. Essas ligas geralmente contêm alumínio ou molibdênio e têm teor de carbono muito baixo. Elementos estabilizadores, como titânio e nióbio, podem ser adicionados para evitar a sensibilização ao impacto e melhorar a soldabilidade (ASM, 1999).

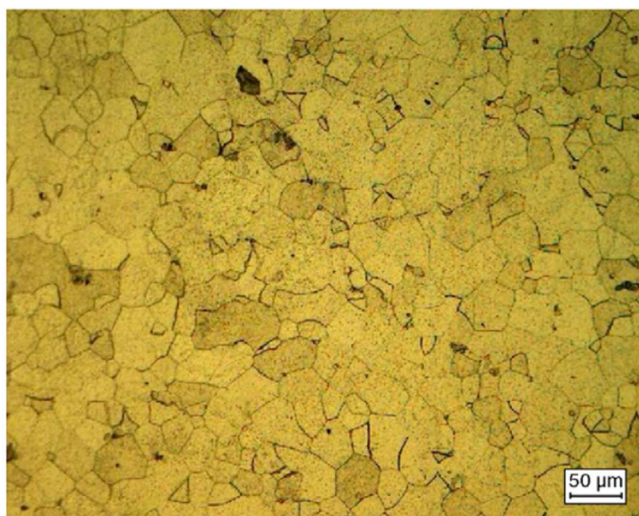
O mais popular dos aços ferríticos é o AISI 430, com teor de cromo superior a 16%, sendo um material com ótima resistência à corrosão, resistente à ação de ácidos como o nítrico e à ação da água do mar. Sua capacidade de estampagem também é boa, mas estampagens muito profundas não podem ser alcançadas com esse tipo de aço (CARBÓ, 2008).

As aplicações do AISI 430 se restringem àquelas que não precisam de soldagem, ou quando a soldagem não é considerada uma operação de alta responsabilidade. Por exemplo, uma pia de cozinha pode ser soldada com a mesa, mas não se pode construir um tanque para estocar ácido nítrico (mesmo que o AISI 430 resista muito bem a este ácido). O baixo desempenho quanto à soldagem se deve à possibilidade de formação parcial da martensita (mesmo com o baixo conteúdo de carbono), a

possibilidade de precipitação de carbonitretos de cromo e o crescimento excessivo do tamanho do grão nas regiões soldadas. Uma solução para este problema de soldabilidade seria fazer o recozimento para alívio de tensões após a soldagem. Porém, isto aumenta os custos e, muitas vezes, pelas características da estrutura soldada, um recozimento não é possível (CHIAVERINI, 2012).

Abreu (2006) realizou um estudo para avaliar o efeito do recozimento em alta temperatura na textura e microestrutura de um aço inoxidável ferrítico AISI 444. A figura 2 revela uma microestrutura ferrítica contendo precipitados de TiN (nitreto de titânio), além de partículas intragranulares, que indicam a presença de elementos estabilizadores como Nb e Ti. Esses elementos são fundamentais para melhorar a estabilidade térmica e a resistência mecânica do material durante os processos de conformação.

**Figura 2 - Fotomicrografia típica de um aço AISI 444 laminada a frio com 60% e recozido a 955 °C.**



**Fonte: ABREU, 2006.**

**Martensíticos:** os aços inoxidáveis martensíticos são classificados na norma AISI referente à série 400 com teor de cromo entre 11,50% e 18,0%. Estes aços podem passar pelo processo de têmpera para endurecer com posterior revenimento para aumentar a ductilidade e a tenacidade. Ao controlar a microestrutura desses materiais por meio dos tratamentos térmicos, é possível alcançar um bom equilíbrio entre suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Essas ligas são ferromagnéticas e

sua estrutura tratada termicamente é tetragonal de corpo centrado (TCC). Na condição recozida, eles têm tensão limite de resistência à tração de cerca de 275 MPa e geralmente são usinados e conformados a frio nesta condição, isso torna os aços inoxidáveis martensíticos uma escolha vantajosa em muitas aplicações industriais que requerem materiais de alta *performance* e durabilidade (CHANDRA et al., 2013; ASM, 1999).

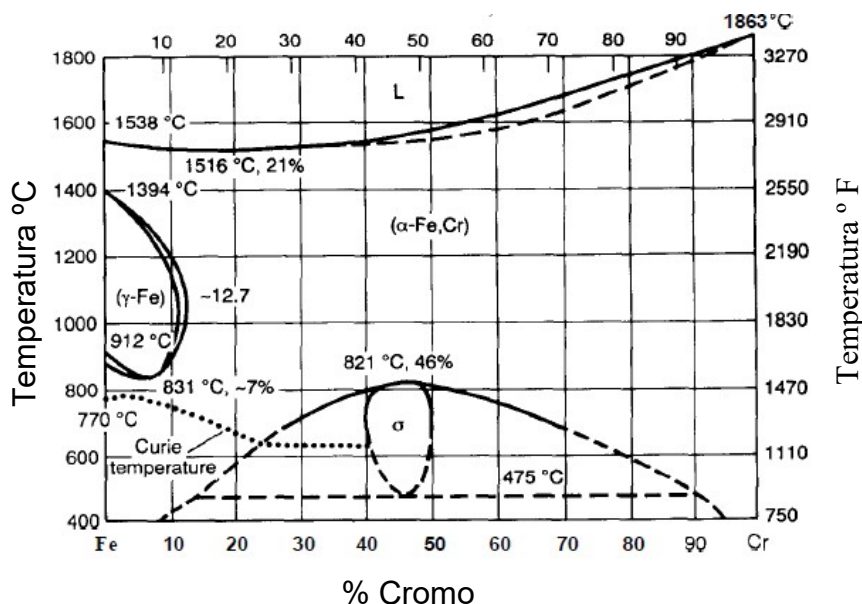
Devido ao cromo ser um poderoso estabilizador de ferrita, é necessário adicionar um forte estabilizador de austenita durante o recozimento para permitir a formação dessa fase. O carbono desempenha esse papel como um estabilizador de austenita altamente eficaz. Consequentemente, esses tipos de aços apresentam um maior teor de carbono para estabilizar a austenita em altas temperaturas. Esse teor de carbono também contribui para o aumento da resistência por meio do reforço da solução sólida e da precipitação de muitos carbonetos (Fe, Cr) (NOONING, 2002).

Além de melhorar a resistência à corrosão, o cromo também aumenta significativamente a temperabilidade desses aços. Juntamente com o silício e o manganês, possibilita a obtenção de uma microestrutura completamente endurecida, permitindo o resfriamento ao ar. Assim, o aço inoxidável martensítico necessita passar pelo tratamento térmico de têmpera, que transforma a ferrita em austenita que é em seguida transformada em martensita durante o resfriamento. Com a têmpera, o carbono forma parte da fase martensítica e não está disponível para se precipitar como carboneto de cromo. No geral, os aços inoxidáveis martensíticos possuem uma resistência mais elevada, mas essa vantagem é acompanhada por menores tenacidade, ductilidade e resistência à corrosão em comparação com os aços inoxidáveis ferríticos ou austeníticos (NOONING, 2002; CARBÓ, 2008).

O diagrama binário de fases ferro-cromo, ilustrado na figura 3, revela que acima de aproximadamente 12% de cromo, as ligas binárias não formarão austenita em nenhuma temperatura, tornando-as impossíveis de endurecer por meio da têmpera. No entanto, ao adicionar carbono às ligas de ferro-cromo, amplia-se a faixa de teores de cromo em que a austenita pode ser formada em temperaturas elevadas, como exemplificado na figura 3. Outros elementos de liga também têm a capacidade de ampliar o intervalo de formação de austenita, como o nitrogênio (N), níquel (Ni), cobre

(Cu) e manganês (Mn). Mesmo com uma composição de 17% de cromo, é possível alcançar uma microestrutura totalmente austenítica com aproximadamente 0,4% de carbono a 1250 °C, possibilitando o endurecimento completo do material (ASM, 1999).

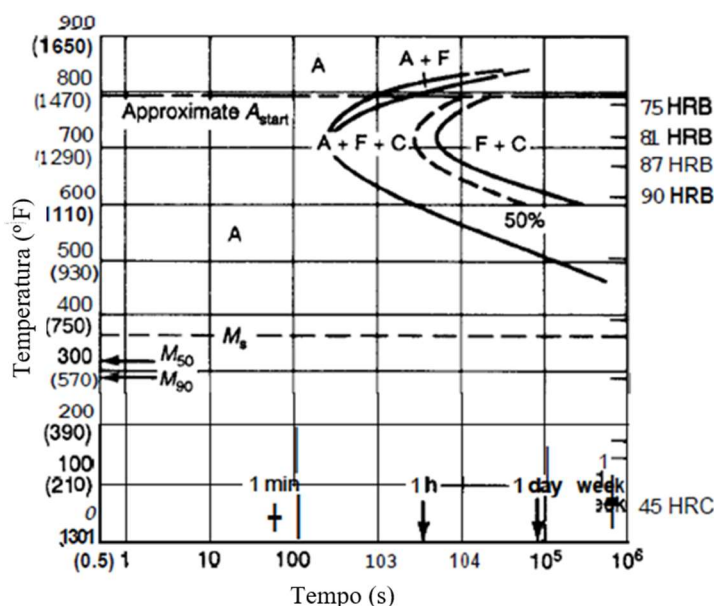
**Figura 3 - Diagrama de equilíbrio Fe-Cr**



Fonte: ASM, 1999 (Adaptado).

A base de todos os aços inoxidáveis martensíticos é o tipo 410, com aproximadamente 12% Cr e 0,10% C. O diagrama de transformação isotérmica para este aço inoxidável é mostrado na figura 4, indicando que, após ser resfriado desde elevada temperatura e ser mantido a aproximadamente 700°C, necessitará de aproximadamente 2 minutos antes que qualquer ferrita se forme e várias horas serão necessárias antes que a transformação em ferrita com carbonetos esteja completa. O resfriamento a uma temperatura de manutenção de 400°C exigirá mais de 1 semana antes que qualquer ferrita se forme (ASM, 1999).

**Figura 4 - Diagrama de transformação isotérmica para o aço AISI 410**



Fonte: ASM, 1999.

**Austeníticos:** os aços inoxidáveis austeníticos constituem a maior família de inoxidáveis em termos de número de ligas e uso, aparecem nas séries 200 e 300 na classificação AISI. A estrutura desses aços é cúbica de faces centradas (CFC) e suas composições são baseadas em um equilíbrio entre os elementos de liga que promovem a formação de ferrita e aqueles que promovem a formação de austenita. Assim como as ligas ferríticas, esses aços não podem ser endurecidos por tratamento térmico, sendo endurecidos apenas por trabalho a frio (ASM, 1999).

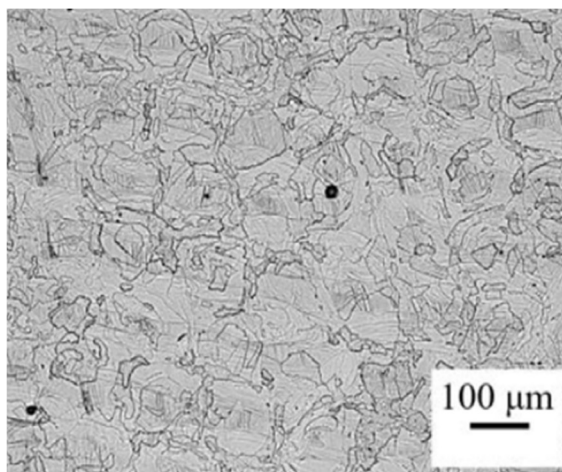
As ligas austeníticas são não magnéticas e possuem excelentes propriedades mecânicas, como ductilidade, conformabilidade e tenacidade, mesmo em baixas temperaturas. Além disso, eles podem ser consideravelmente endurecidos por trabalho a frio (CHIAVERINI, 2012).

O teor de cromo normalmente varia de 16 a 26%, o níquel pode chegar até 35% e o teor de manganês até 15,5%. Os aços da série 300 são ligas formadas basicamente de Fe-Cr-Ni, contendo quantidade maior de níquel e até 2% de Mn. Molibdênio, cobre, silício, alumínio, titânio e nióbio podem ser adicionados para conferir certas características, como resistência à corrosão e à oxidação. Além disso, enxofre ou selênio podem ser adicionados para melhorar a usinabilidade.

Os aços inoxidáveis austeníticos são significativamente prejudicados com a precipitação de carbonetos de cromo, o que gera corrosão intergranular. Com adição de titânio e nióbio na liga pode-se evitar essa corrosão, esses elementos se unem ao carbono na forma de carbonetos de titânio e de nióbio. Uma das formas de evitar também a precipitação dos carbonetos é realizar o tratamento térmico de solubilização (CHIAVERINI, 2012).

Na figura 5 é apresentada uma micrografia de um aço inoxidável austenítico.

**Figura 5 - Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico**



Fonte: MISHRA, 2023.

### 3.4 Estampagem

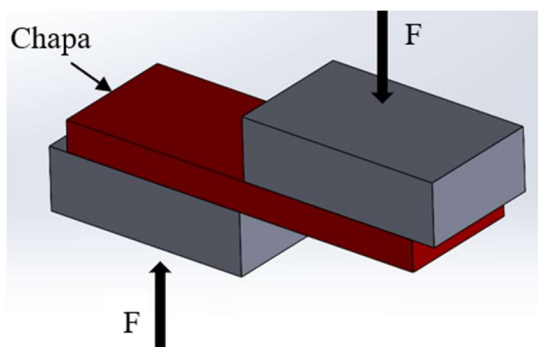
Estampagem é uma operação de deformação plástica de chapas por conformação mecânica, sendo normalmente um processo que envolve várias operações para gerar um produto com forma geométrica específica. Durante este processo, uma chapa é submetida a uma sequência de operações básicas, compreendendo, por exemplo, dobramento, estiramento, corte, embutimento e cunhagem (BRESCIANI FILHO, 2011; ASM, 1999).

#### 3.4.1 Operações de estampagem

**Corte:** de forma geral, as chapas são fornecidas em bobinas, sendo a primeira operação cortá-las em blanks, como, por exemplo, na forma de discos. Neste

processo, uma lâmina (ou tira) metálica é intensamente deformada plasticamente até o ponto em que ocorre a ruptura nas superfícies em contato com a ferramenta. Na região de corte, o material tende a sofrer encruamento, o que pode influenciar negativamente as etapas subsequentes de conformação (ASM, 1999), figura 6.

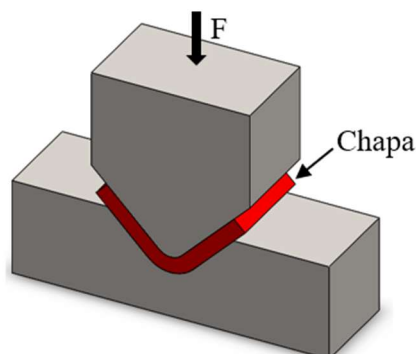
**Figura 6 – Esquema do processo de corte cisalhamento**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

**Dobramento:** Presente em praticamente todas as operações de estampagem (figura 7), o dobramento apresenta como uma de suas principais dificuldades a recuperação elástica do material também conhecida como efeito mola, o que compromete a obtenção de peças com dimensões precisas. Essa recuperação dificulta não apenas o alcance da geometria desejada, mas também a repetibilidade do ângulo de dobra. O efeito torna-se mais acentuado quanto maior for o limite de escoamento do material, menor o módulo de elasticidade e maior a deformação plástica imposta. Como as propriedades mecânicas podem variar significativamente em função da direção do dobramento devido à orientação cristalográfica, a relação entre a direção de dobra e a direção de laminação da chapa deve ser cuidadosamente considerada. Uma maneira eficaz de minimizar o retorno elástico durante a conformação é manter a pressão aplicada por um tempo adicional ao final do processo, permitindo estabilizar a nova geometria da peça antes da liberação da ferramenta. (ASM, 1999).

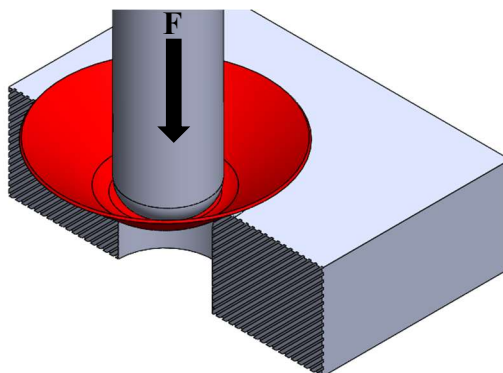
**Figura 7 - Esquema do processo de dobramento.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

**Estiramento:** o estiramento exemplificado na figura 8 é uma técnica importante na fabricação de componentes metálicos, especialmente no processo de estampagem profunda. Durante esse processo, o material (geralmente uma chapa metálica) é submetido a forças de tração que o alongam sobre uma matriz, resultando em uma peça tridimensional. O estiramento ajuda a distribuir as tensões uniformemente, reduzindo o efeito de retorno elástico (efeito mola), um problema comum que pode afetar a precisão da conformação. Isso acontece porque o gradiente de tensões, ou seja, a diferença nas tensões internas do material, é minimizado, tornando o processo mais estável. Além disso, o estiramento provoca um fenômeno conhecido como encruamento, o que significa que o material se torna mais resistente à medida que é deformado. Esse endurecimento ocorre principalmente nas paredes do copo ou peça conformada, onde o material é mais alongado (SCHULTE *et. al.*, 2017).

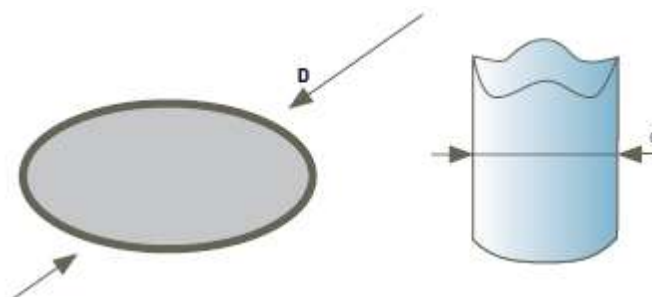
**Figura 8 – Esquema do processo de estiramento.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na prática, as operações de conformação industrial envolvem uma combinação de deformação por repuxo puro e por estiramento em uma série de passes. No repuxo, os aços inoxidáveis ferríticos apresentam valores da razão limite de estampagem, tradução do termo *Limited Drawing Ration* (LDR) (figura 9) mais elevados, tornando-o mais adequado para o repuxo quando comparado com os aços inoxidáveis austeníticos. O LDR se refere ao quociente do diâmetro máximo do *blank* que pode sofrer o repuxo profundo pelo valor do diâmetro do punção. Na figura 9 está ilustrado um esquema que mostra essa relação entre o diâmetro do *blank* com o diâmetro de um copo estampado (ISSF – *International Stainless Steel*, 2007).

**Figura 9 - Limited Drawing Ration (LDR).**



Fonte: ISSF, 2007.

Sendo o LDR calculado conforme a equação (1):

$$\text{LDR} = D/d \quad (1)$$

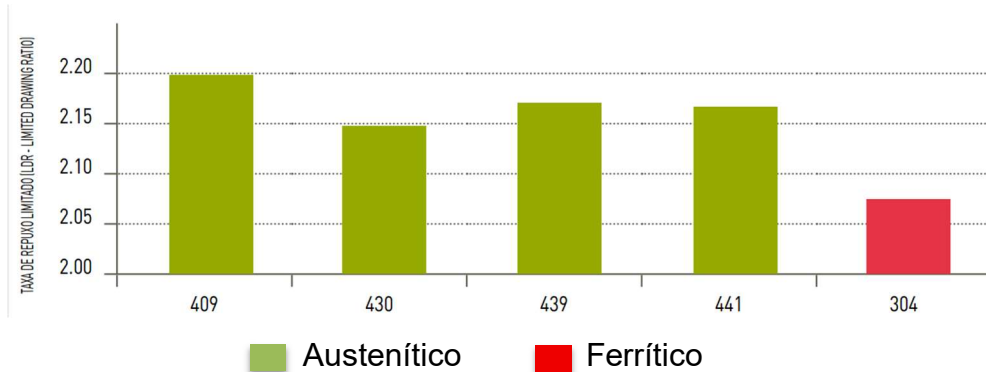
Onde:

D = diâmetro do blank imediatamente anterior à fratura da chapa (disco metálico inicial).

d = diâmetro do punção (a ferramenta que força o material a se conformar).

A figura 10 ilustra que os aços inoxidáveis ferríticos possuem boa capacidade de conformação, tornando-os especialmente adequados para processos de repuxo profundo. Esse comportamento indica uma maior resistência à ocorrência de falhas durante a conformação, sendo, portanto, uma escolha vantajosa para aplicações que exigem alta conformabilidade (ISSF – *International Stainless Steel*, 2007).

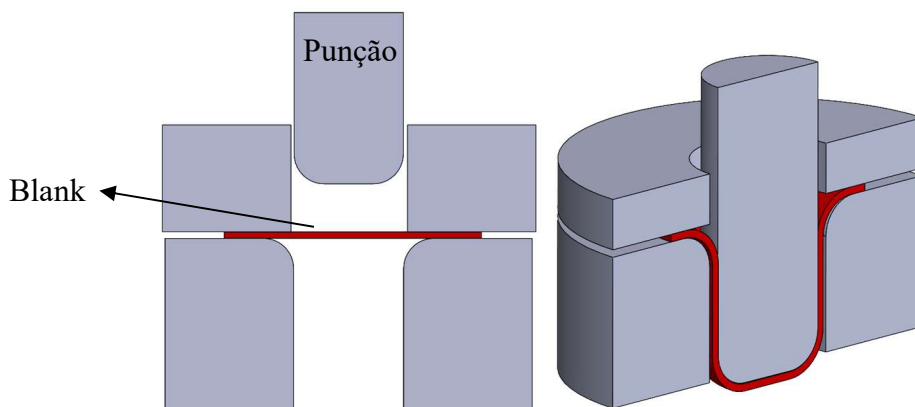
**Figura 10 - Comparação de LDR de alguns aços inoxidáveis**



Fonte: ISSF, 2007 (Adaptado).

**Embutimento:** o embutimento ou repuxo (figura 11) é uma operação de estampagem onde a chapa é inicialmente colocada em um estampo (composto por um punção e matriz) e em seguida forçada pelo punção contra a matriz com objetivo de transformar o material em diferentes geometrias sem que haja aparecimento de rugas e trincas. Durante o processo, a lubrificação é extremamente importante, pois a chapa estará em contato com ferramentas diversas durante todo o processo de estampagem. A eficiência no processo de embutimento está relacionada, dentre outras variáveis, com o coeficiente de anisotropia (MESQUITA, 1997).

**Figura 11 – Esquema do processo de embutimento**



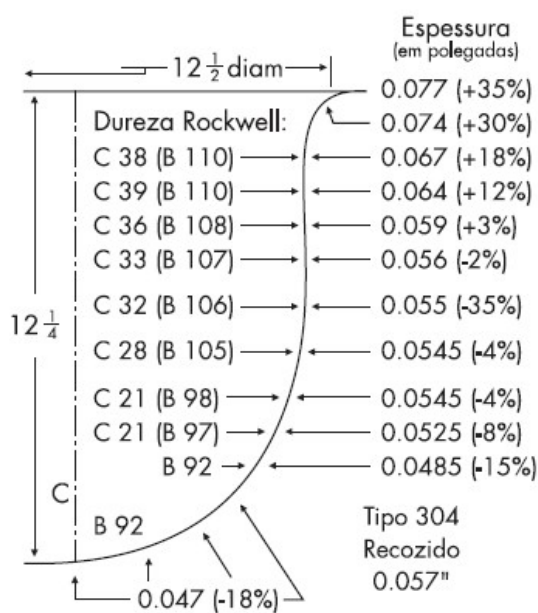
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na operação de embutimento existem quatro regiões distintas com diferentes níveis de deformação que ocasionam modificações no valor da espessura inicial da chapa, conforme ilustrado na figura 12:

-A parte plana do fundo da peça, onde a espessura final é aproximadamente a mesma do blank. Nessa região, há pouca ou nenhuma deformação significativa.

- O raio do fundo da peça, onde ocorre uma deformação significativa na espessura. Nessa área, a espessura é alterada devido às tensões de compressão e tração.
- O raio da matriz, onde ocorre um aumento na espessura devido às diferenças entre as tensões de tração, compressão e a componente tangencial (cisalhante). Essas tensões resultam em um acúmulo de material e, conseqüentemente, no aumento da espessura.
- As paredes laterais, onde ocorre um decréscimo gradual da espessura em direção ao fundo da peça. Nessa região, a espessura diminui à medida que o material é distribuído ao longo das paredes laterais em direção ao fundo da peça (MESQUITA, 1997).

**Figura 12 – Variação da espessura da chapa de acordo com a região no repuxo do material AISI 304 recozido com espessura inicial de 0.057”.**



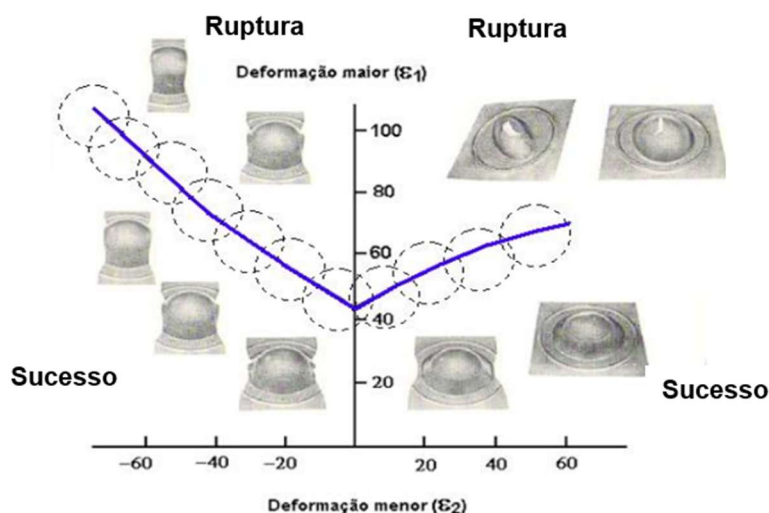
Fonte: MESQUITA, 1997.

### 3.5 Curvas limites de conformação (CLC)

Além da razão limite de estampagem, LDR, as curvas de limite de conformação (CLC) sinalizam a fronteira entre as deformações máximas que um material pode tolerar durante uma operação de estampagem antes de ocorrer a falha. O comportamento das deformações de um componente submetido à estampagem é comparado com a CLC do material em questão. Qualquer combinação que se encontre abaixo da curva

indica deformações que o material pode resistir, enquanto aquelas situadas acima da curva representam deformações que o material não conseguirá suportar (figura 13). Vários fatores, como a espessura, textura, coeficiente de atrito, entre outros, exercem influência sobre a posição da CLC, podendo deslocar a curva para cima ou para baixo, ou seja, aumentar ou diminuir a conformabilidade do material. (FOLLE, L. F. et al., 2008; ISSF – *International Stainless Steel*, 2007; BITTENCOURT, 2014).

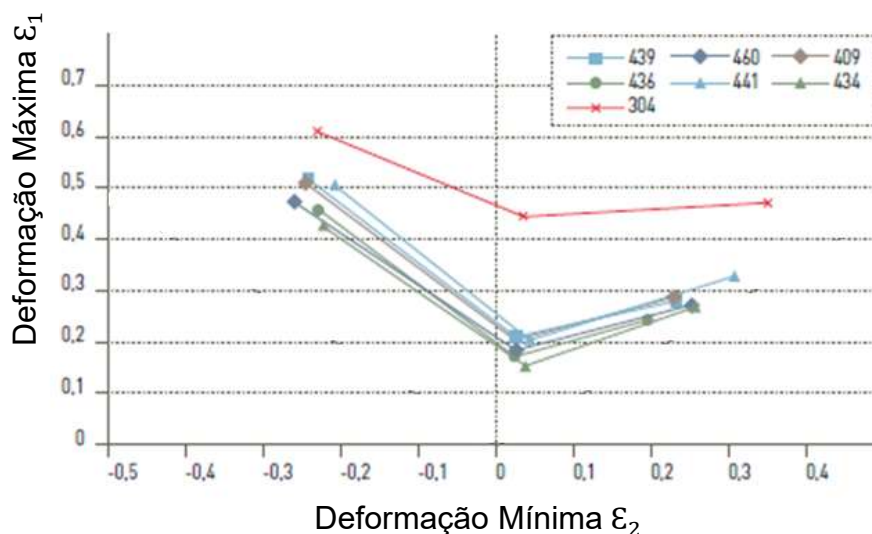
**Figura 13 - CLC obtida pelo método de Nakajima**



Fonte: BITTENCOURT, 2014 (Adaptado).

Na figura 14 são apresentadas as curvas CLC a partir dos valores de deformações ortogonais (longitudinal e transversal) de vários aços inoxidáveis ferríticos e o austenítico AISI 304, com maior estampabilidade dentre os mostrados nessa figura.

**Figura 14 - Curvas de limite de conformação.**



Fonte: ISSF, 2007 (Adaptado).

Estas curvas servem para avaliar a severidade das deformações do material durante o processo de estiramento, estampagem profunda e tração. Definem as deformações locais durante e depois da conformação no que se refere às duas principais deformações verdadeiras: a longitudinal e a transversal. As curvas simulam os efeitos de várias combinações destas duas deformações, até o ponto da fratura. Quanto mais alta a posição da curva melhor a conformabilidade do aço (ISSF – *International Stainless Steel*, 2007).

Mesmo que alguns resultados mostrem que os aços inoxidáveis austeníticos são superiores em termos de conformabilidade, as vantagens de custo dos ferríticos é um fator a ser considerado, sendo os ferríticos usados em diversos métodos de estampagem, onde se tem uma gama extensa de aplicações, eles apresentam inclusive um comportamento melhor que os austeníticos como já mencionado (ISSF – *International Stainless Steel*, 2007).

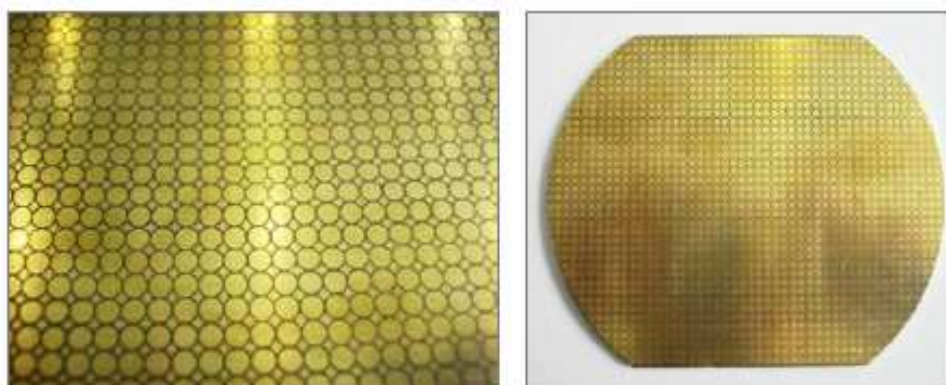
A verificação das curvas é direta quando se procura produzir uma peça livre de fraturas, para isso todas as combinações de deformações devem permanecer abaixo da linha limite de acordo com o material analisado. Mesmo conseguindo uma chapa sem ruptura, alguns pontos podem se aproximar da curva limite. Contudo, durante o processo de estampagem mudanças nas propriedades do material e até mesmo nos parâmetros de operação podem ocasionar deformações que levarão à falha de um

material. A obtenção das CLC's pode ser por meios experimentais com ensaios em laboratório ou meios teóricos por modelos matemáticos com base em propriedades mecânicas do material (SANTOS, 2003).

No método experimental, o modelo de Nakazima é amplamente empregado. O ensaio é realizado utilizando um punção semiesférico, que induz deformações em corpos de prova com diferentes larguras. Esses corpos de prova são equipados com malhas de deformação que cobrem toda a sua superfície, sendo as formas circulares as mais comuns. A deformação no corpo de prova é continuada até que ocorra o escoamento ou fratura em uma região específica. A carga final aplicada no corpo de prova, a velocidade da deformação, a força exercida pelo dispositivo de prensagem e as rugosidades do sistema são parâmetros cruciais nesse ensaio, uma vez que esses fatores podem influenciar o momento e a localização da ocorrência da fratura. (FILHO et al., 2010).

Filho. et al. (2010) realizaram experimentos com o latão 70/30, uma liga composta por cobre, zinco, chumbo e ferro. Conforme ilustrado na figura 15, é possível observar a configuração da marcação usada nos corpos de prova usados neste ensaio, consistindo de uma gravação eletroquímica em formato de círculos para avaliar e obter a Curva de Limite de Conformação (CLC).

**Figura 15 - Resultado das gravações dos círculos no corpo de prova**



Fonte: Filho, 2010.

O ensaio é realizado com uso de um punção hemisférico até ocorrer a ruptura dos corpos de prova, permitindo que os círculos sejam deformados, tornando-se elipses

que são posteriormente analisadas para mensurar as respectivas deformações sofridas ao longo de dois eixos ortogonais entre si, de maior e menor deformação. Na sequência, os resultados são transformados em valores de deformação como exibido na equação 2 (SANTOS, 2003).

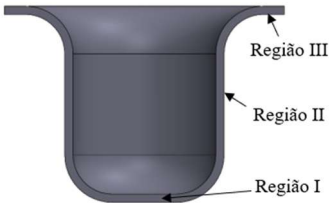
$$\varepsilon_1 = 2 \cdot \ln\left(\frac{df_1}{d_0}\right), \varepsilon_2 = 2 \cdot \ln\left(\frac{df_2}{d_0}\right) \quad (2)$$

Onde:  $\varepsilon_1$  = deformação verdadeira máxima,  $\varepsilon_2$  = deformação verdadeira mínima,  $D_{f1}$  = diâmetro final ao longo do eixo de maior deformação da elipse,  $D_{f2}$  = diâmetro final ao longo do eixo de menor deformação da elipse. Para cada corpo de prova é gerado um conjunto de pares de pontos de deformação maior e menor ( $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ ), respectivamente que são dados para elaboração do gráfico formando a curva CLC para cada material (SANTOS, 2003; LIMA, 2022).

Na estampagem profunda de um copo sem aba, diferentes regiões do componente estão associadas a diferentes modos de deformação e esforços mecânicos. A relação entre cada quadrante da curva limite de conformação (CLC) e as posições específicas no copo são apresentadas a seguir.

A tabela 1 mostra os esforços mecânicos que ocorrem na estampagem profunda de um copo, a região I (tração biaxial) está associado ao fundo do copo, onde o material é tracionado uniformemente em todas as direções ( $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0$ ) devido a esforços positivos em ambos os eixos. A região II (tração uniaxial) é predominante nas zonas intermediárias entre o fundo e as paredes do copo, onde ocorre tração em uma direção ( $\varepsilon_1 > 0$ ), enquanto a outra direção está livre ( $\varepsilon_2 \approx 0$ ), refletindo esforços mecânicos unidimensionais com deformações ( $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 \approx 0$ ), essa região suporta forças unidimensionais, sendo propensa a reduções localizadas de espessura, o que pode levar a instabilidades se o material não tiver boa ductilidade. Já a região III (tração-compressão) se manifesta nos flanges ou abas da chapa, onde o material sofre tração em uma direção ( $\varepsilon_1 > 0$ ) e compressão na direção perpendicular ( $\varepsilon_2 < 0$ ). A tabela mostra um resumo destas associações entre os quadrantes. (KOHL, DORIS; MERKLEIN, MARION, 2022).

Tabela 1 - Características e associações de cada quadrante

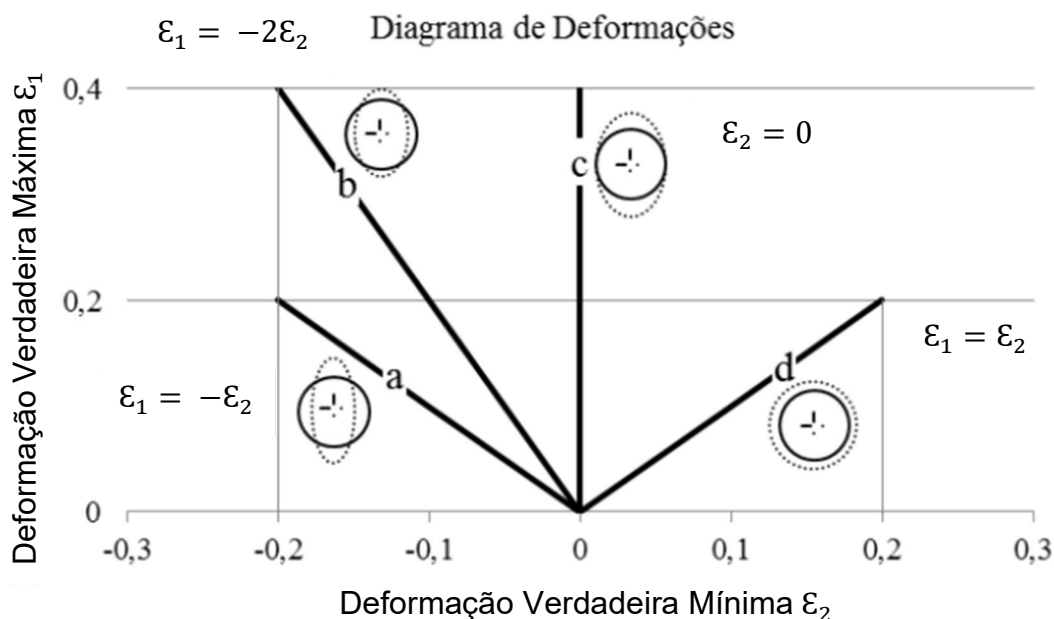
|                                                                                   |            |                    |                    |                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------|--------------------|------------------------------------------|
|  | Região CLC | Região do copo     | Modo de deformação | Esforço mecânico                         |
|                                                                                   | I          | Fundo              | Tração biaxial     | $(\epsilon_1 > 0, \epsilon_2 > 0)$       |
|                                                                                   | II         | Zona intermediária | Tração uniaxial    | $(\epsilon_1 > 0, \epsilon_2 \approx 0)$ |
|                                                                                   | III        | bordas             | Tração-compressão  | $(\epsilon_1 > 0, \epsilon_2 < 0)$       |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

A figura 16 ilustra o Diagrama de Deformações  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , relacionando as deformações verdadeiras com os tipos específicos de deformação, destacando: (a) embutimento profundo; (b) estiramento de tração onde a deformação ocorre em uma direção principal; (c) deformação plana, que apresenta deformação em um plano com mínima alteração em espessura; e (d) estiramento biaxial, caracterizado por uma deformação uniforme em duas direções perpendiculares, resultando em um aumento equilibrado de área (LORA, 2014). Esses tipos de deformação são fundamentais na análise de processos de conformação, pois cada um deles afeta a estrutura e a resistência do material de maneira distinta.

**Figura 16 - Determinação de  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  por meio das diagonais a e b das elipses.**

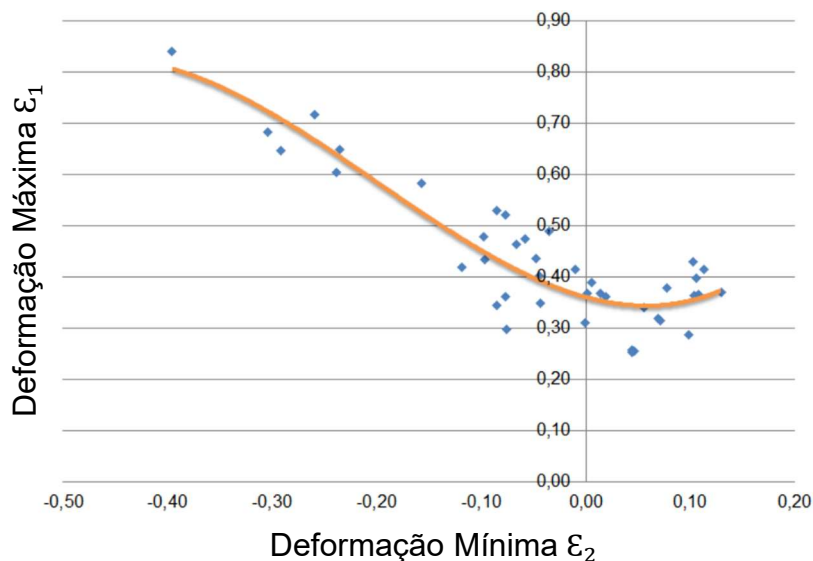
**Tipos de deformações existentes.**



Fonte: Lora, 2014 (Adaptado)

Langbehn et al. (2022) realizou um estudo sobre a conformabilidade do aço AISI 1008 e gerou a curva limite de conformação (CLC) conforme figura 17 a seguir. Ele relata que as curvas CLC para os aços carbono possuem quase sempre o mesmo formato, mudando apenas o ponto de intersecção com o eixo  $\epsilon_1$ . Esse ponto está relacionado com o coeficiente de encruamento do material, espessura da chapa e tipo de lubrificação utilizada.

**Figura 17 - Curva limite de conformabilidade (CLC) do AISI 1008.**



Fonte: Langbehn et al., 2022

### 3.5.1 Fatores que influenciam na obtenção da curva limite de conformação

Diversos fatores, como a espessura, direção de laminação, coeficiente de atrito, entre outros, desempenham um papel crucial na posição da Curva de Limite de Conformação (CLC), podendo resultar em seu deslocamento para cima ou para baixo, influenciando assim a estampabilidade de um material.

- espessura: chapas com espessura maior tendem a suportar valores também maiores de deformação, o que se traduz em um deslocamento da CLC para uma posição mais elevada;
- atrito: um coeficiente de atrito mais baixo permite valores maiores de deformação e, conseqüentemente, a um posicionamento mais elevado das curvas da CLC;
- direção de laminação: corpos de prova cortados na direção de laminação tendem a apresentar maior deformação, enquanto aqueles cortados perpendicularmente à direção de laminação exibem limite menor de deformação. Contudo, tal análise deve considerar todo o ciclo de processamento que o material foi submetido e conseqüentemente, a variação da orientação cristalográfica;
- tamanho de grão: um tamanho de grão menor resulta em um posicionamento mais alto da curva da CLC, ou seja, quanto menor o tamanho de grão, maior tende a ser a estampabilidade do material;
- velocidade do punção: uma velocidade mais baixa do punção aumenta a capacidade do material de ser deformado, levando a um posicionamento mais elevado da CLC.

Esses fatores desempenham um papel fundamental na avaliação da estampabilidade de um material e são cruciais para entender como ele se comportará durante a conformação (FOLLE et al., 2008).

De modo geral, a capacidade de conformação de uma chapa metálica é estimada com base em diagramas de limite de conformação onde a curva estabelece o critério de falha no processo. Uma desvantagem neste método é assumir que os caminhos de deformação são praticamente lineares, mas na prática ocorrem alterações na

trajetória da deformação em relação à curva limite de conformação, formando uma deformação em caminhos complexos. A simulação numérica permite que sejam analisados diferentes casos, ampliando assim as possibilidades de conformação (LUMELSKYY et al., 2012).

### **3.6 Lubrificação**

A relevância da lubrificação integrada nos processos de conformação de chapas metálicas evidencia fatores como espessura do material, textura da superfície e coeficiente de atrito afetam a curva de limite de conformabilidade (CLC). A lubrificação ativa reduz significativamente a força de estampagem e melhora as condições de atrito, sistemas de estampagem com lubrificação integrada aumentam a eficiência do processo e contribuem para a sustentabilidade, reduzindo desperdícios de material e energia. Além disso, destaca-se que os requisitos de lubrificação são mais críticos na conformação de aços inoxidáveis do que em aços carbono e outras ligas, devido à necessidade de preservar a superfície de alta qualidade e à maior resistência mecânica, menor condutividade térmica e maior coeficiente de atrito dos aços inoxidáveis. Esses fatores fazem com que escoriações e lascas ocorram mais facilmente, enquanto temperaturas mais altas são atingidas em um volume maior da peça, o que pode levar ao superaquecimento local ou geral, alterando as propriedades do produto conformado e a eficácia do lubrificante (LACHMAYER, ROLAND et al., 2022; ASM, 1999).

Os efeitos funcionais dos lubrificantes são os de diminuir os carregamentos necessários para a deformação, aumentar os limites de deformação antes da fratura, aperfeiçoar o controle do acabamento da superfície, reduzir a adesão do metal ao ferramental, diminuir o desgaste das ferramentas, isolar e resfriar termicamente ferramentas e materiais em conformação (MARCONDES, 2003).

As características desejáveis de um lubrificante incluem a capacidade de reduzir o atrito e o desgaste, dissipação de calor, durabilidade, não reatividade com o aço base e facilidade de remoção. Na Tabela 2 são listados os lubrificantes normalmente usados na conformação de aços inoxidáveis por vários processos. As classificações

consideram eficácia, limpeza, facilidade de remoção e outros fatores de adequação (ASM, 1999).

**Tabela 2 - Adequação de vários lubrificantes para uso na conformação de aço inoxidável (A - excelente; B - bom; C - aceitável; NR - não recomendado).**

| Lubrificante                            | Conformação de prensas | Estampagem profunda | Repuxamento |
|-----------------------------------------|------------------------|---------------------|-------------|
| Óleos graxos e misturas (a)             | C                      | C                   | A           |
| pastas de sabão e gordura(b)            | C                      | B                   | B           |
| Pastas à base de cera (b)               | B                      | B                   | B           |
| Emulsões para trabalho pesado (c)       | B                      | B                   | B           |
|                                         | B                      | B                   | A           |
| Película seca (cera ou sabão, bórax)    | A                      | A                   | C           |
| Tipo (g) de alta viscosidade            | A                      | A                   | NR          |
| Tipo (k) de baixa viscosidade           | A                      | B                   | NR          |
| Grafite ou dissulfeto de molibdênio (m) | (n)                    | (n)                 | NR          |

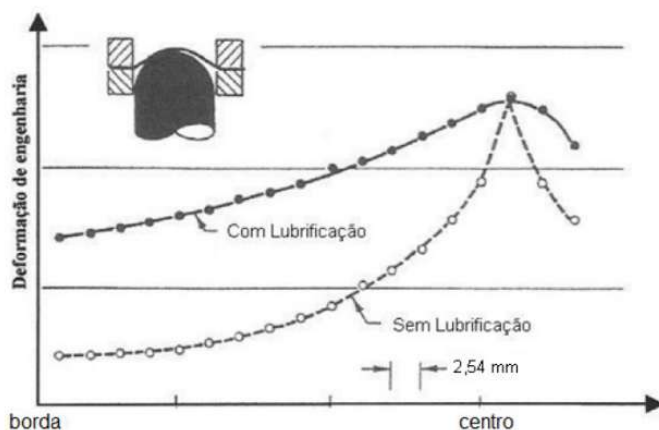
Tipos: **a)** óleo mineral é usado para misturar, **b)** Pode ser diluído com água, **c)** Emulsões aquosas de óleos solúveis; conter uma alta concentração de compostos de enxofre ou cloro de pressão extrema, **g)** Viscosidade de 4000 a 20000 SUS, **k)** Viscosidade (200 a 1000 SUS) é influenciada por óleo base ou cera. grau de cloração. e adições de óleo mineral, **m)** Lubrificante sólido aplicado a partir de dispersões em ml, solvente ou água, **n)** Indicado para aplicações de conformação a quente.

**Fonte: ASM, 1999 (Adaptada).**

Alguns lubrificantes atacam determinados metais, inclusive aos aços inoxidáveis. lubrificantes a base de chumbo e zinco promovem a corrosão intergranular nos aços inoxidáveis quando estes são submetidos a tratamento térmico ou trabalho a quente e por isso devem ser evitados (MESQUITA, 1997).

Na figura 18 está demonstrada a distribuição da deformação em função do tipo de lubrificação, proporcionando uma estampagem homogênea, diminuindo a amplitude entre as maiores e menores deformações e suavizando o crescimento dos picos de deformação (KEELER, 1965 apud BASTOS, 2009), quando se observa que para ambas as condições avaliadas, com e sem lubrificação, existe a tendência da quantidade de deformação da borda ao centro do material, mas com menor variação entre essas regiões na estampagem conduzida com lubrificação.

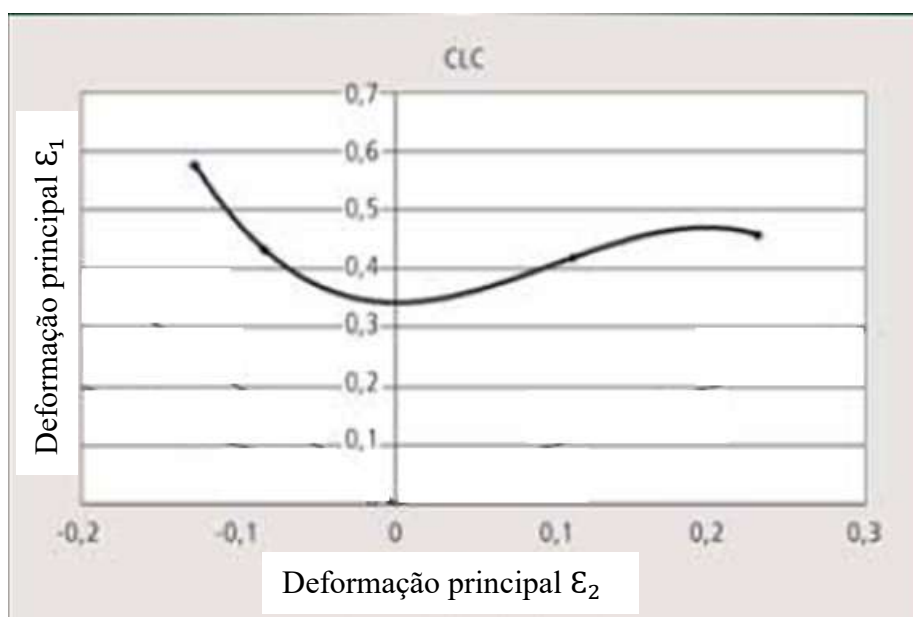
**Figura 18 - Perfis de distribuição das deformações obtidas no estiramento, com e sem lubrificação do punção**



Fonte: (KEELER, 1965 apud BASTOS, 2009).

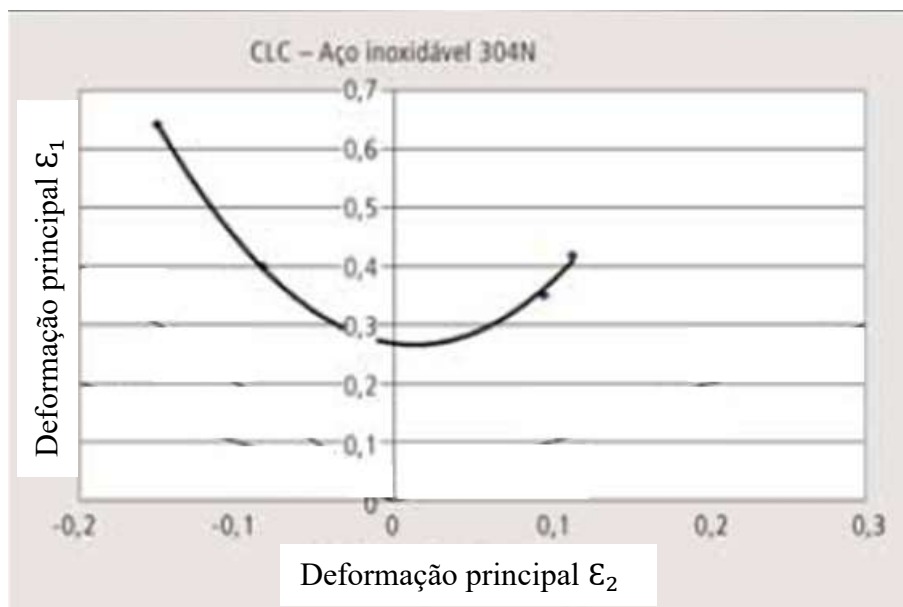
Folle, et al. (2008), conduziram um estudo abordando o aço inoxidável 304N, no qual eles elaboraram a curva de limite de conformação (CLC) sob a influência de diferentes lubrificantes. Durante o experimento, foram utilizadas almofadas de poliuretano e óleo mineral como lubrificantes. As figuras 19 e 20 ilustram as variações observadas nas curvas CLC resultantes deste estudo.

**Figura 19 - Curva-limite de conformação obtida para o aço inox 304N, com lubrificante de poliuretano.**



Fonte: Folle, 2008 (Adaptada)

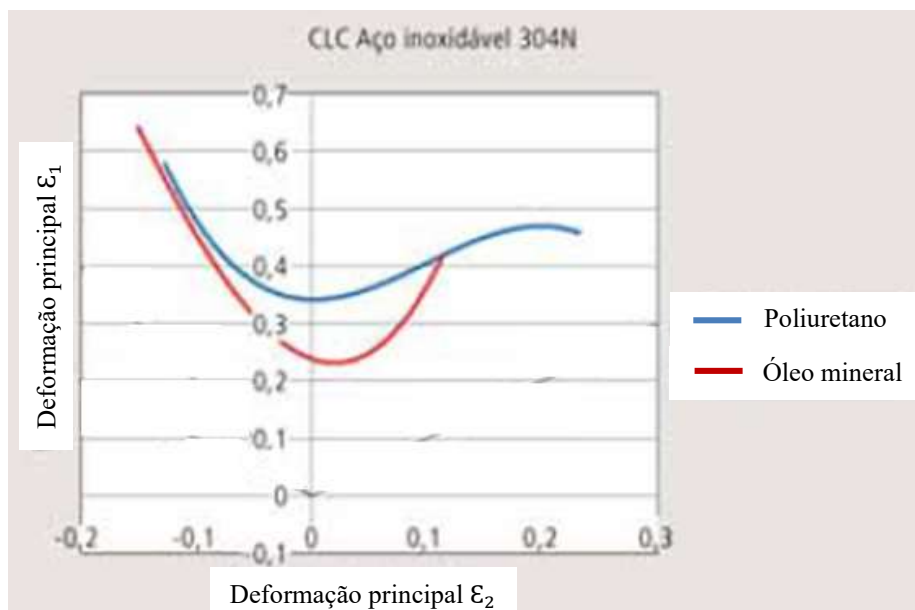
**Figura 20 - Curva-limite de conformação obtida para o aço inox 304N, com lubrificante mineral**



**Fonte: Folle, 2008(Adaptado)**

Na figura 21, pode-se observar as curvas obtidas ao utilizar os lubrificantes mineral e de poliuretano durante o teste com o aço inoxidável 304N. Notavelmente, a curva do material lubrificado com óleo mineral está posicionada abaixo da curva correspondente ao lubrificante de poliuretano. Esse fenômeno se deve à superioridade do coeficiente de atrito mais baixo proporcionado pelo lubrificante de poliuretano entre a chapa e o punção. A redução na posição da Curva de Limite de Conformação (CLC) ao aplicar o lubrificante mineral ocorre devido ao comportamento do lubrificante líquido quando sujeito à pressão, onde há um ponto crítico em que o lubrificante atinge seu limite de eficácia. Após esse ponto, o filme de óleo se rompe, fazendo com que as superfícies entrem em contato como se não houvesse lubrificação. Isso resulta em uma distribuição irregular das deformações, limitando a capacidade do material de ser conformado de forma mais eficiente (FOLLE et al., 2008).

**Figura 21 - Diagrama comparativo das curvas obtidas utilizando o lubrificante de óleo mineral e o de poliuretano.**



Fonte: Folle, 2008 (Adaptado)

Folle (2008) e sua equipe concluíram que, ao obter a curva de limite de conformação (CLC) usando um lubrificante inadequado, o material sofre deformações limitadas, resultando em uma curva que não reflete sua real capacidade. Eles observaram que o lubrificante de poliuretano (figura 19) permite alcançar a capacidade real que o material pode atingir, o que, por sua vez, possibilita o projeto de peças em que os limites de segurança são mais bem aproveitados.

### 3.7 Fatores que afetam a estampabilidade dos aços

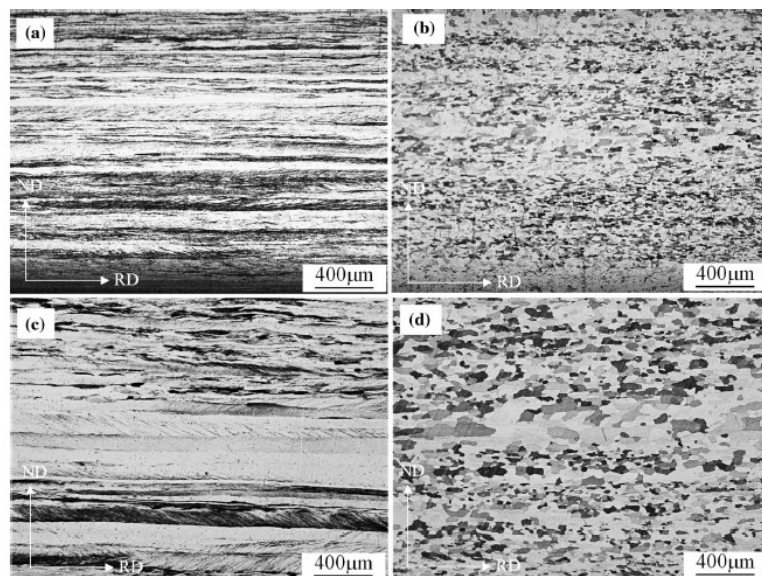
#### 3.7.1 Formação de textura

A formação de textura em aços inoxidáveis ferríticos durante o processo de laminação é um fenômeno crucial na indústria metalúrgica, pois impacta diretamente as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão desses materiais. A laminação a frio, que foi o processo de obtenção do material em estudo, é um processo de conformação mecânica que envolve a deformação do metal a temperaturas abaixo da temperatura de recristalização. Durante esse processo, a estrutura cristalina do material pode ser modificada, resultando na formação de textura.

Houlong Liu; et al (2023) realizou um experimento que ilustrou a formação de textura em um aço inoxidável ferrítico durante os processos de laminação a quente e a frio, como apresentado nas figuras 22 e 23. A figura 22 ilustra a microestrutura das amostras laminadas a quente, destacando a presença de grãos alongados na direção de laminação (RD) e a formação de estruturas em banda. Observa-se que a amostra com espessura de 3 mm apresenta grãos mais finos em comparação com a amostra de 5 mm, indicando que a espessura e o grau de deformação influenciam a microestrutura. No experimento foi feita uma recristalização completa na amostra de 5 mm, evidenciando como o tratamento térmico pode promover a homogeneização da microestrutura e a formação de uma textura que potencialmente melhora a conformabilidade do material. A figura 23 apresenta a microestrutura das chapas laminadas a frio e suas contrapartes tratadas termicamente, mostrando grãos alongados paralelamente à direção de laminação (RD) que são característicos desse processo. Após o tratamento térmico, as amostras exibem uma microestrutura completamente recristalizada. Essa recristalização não apenas refina a microestrutura, mas também resulta em uma textura que pode ser mais favorável para a conformabilidade, evidenciando a importância da combinação de deformação e tratamento térmico na evolução da textura do aço inoxidável ferrítico.

Os resultados obtidos forneceram resultados valiosos sobre as mudanças na microestrutura do material e suas propriedades mecânicas associadas durante esses processos. Nas figuras é possível observar claramente como a textura do aço inoxidável ferrítico se desenvolveu durante a laminação. O que permite compreender melhor as mudanças na orientação dos grãos e a distribuição das fases dentro do material, o que é fundamental para a qualidade e o desempenho em aplicações específicas (Houlong Liu; et al., 2023).

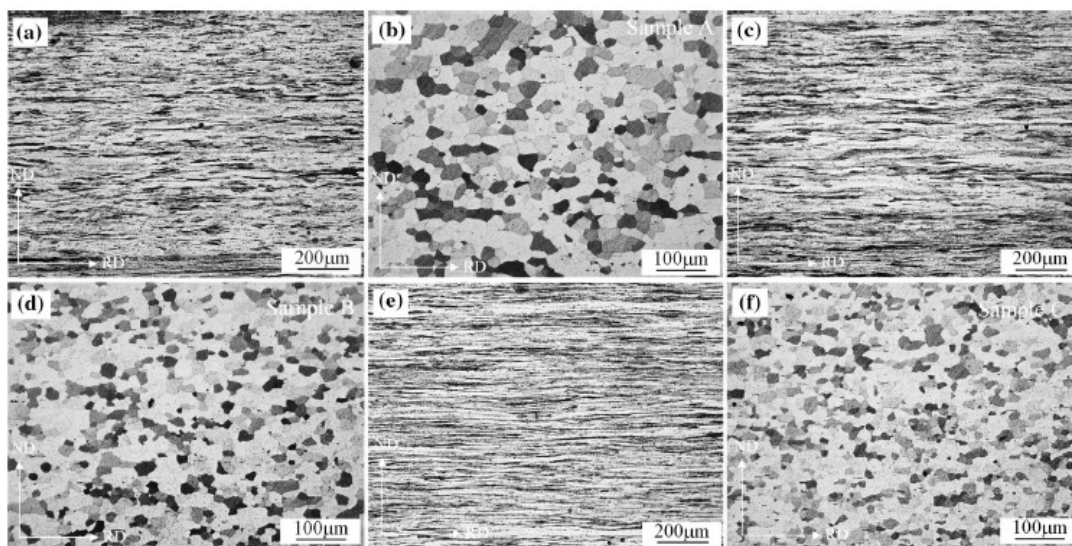
**Figura 22 - Imagens obtidas por microscopia óptica da chapa laminada.**



**a)** Chapa de 3mm Laminada a quente, **b)** chapa recozida com espessura de 3 mm (após laminação a quente), **c)** chapa de 5mm laminada a quente, **d)** chapa recozida com espessura de 5 mm (após laminação a quente).

**Fonte: Houlong Liu et al., 2023.**

**Figura 23 - Microestrutura de chapas laminadas a frio e recozidas correspondentes com vários graus de reduções de laminação a frio.**



Redução: (a, b) 60%, (c, d) 70% e (e, f) 80%.

**Fonte : Houlong Liu et al., 2023.**

Ainda segundo Houlong Liu et al. (2023), as propriedades mecânicas e a conformabilidade das amostras, apresentando curvas de tensão-deformação que demonstram que a resistência do material aumenta com o aumento da redução de laminação a frio. Com o aumento da redução, tanto a resistência à tração quanto o

limite de escoamento aumentam, evidenciando que a deformação a frio é eficaz em melhorar as propriedades mecânicas do aço. Além disso, a presença de texturas favoráveis, resultantes de altas reduções de laminação a frio, contribui para uma melhor conformabilidade, permitindo que o material seja moldado mais facilmente sem falhas. A laminação a frio é destacada como superior em termos de aumento da resistência e melhoria da conformabilidade, em comparação com a laminação a quente, que não proporciona os mesmos benefícios.

Nos processos de estampagem profunda, após a deformação plástica, podem surgir defeitos superficiais conhecidos como “estrias”. Esses defeitos podem ser parcialmente evitados através da estabilização ou por operações superficiais que pode aumentar a quantidade de discordâncias nos aços inoxidáveis ferríticos e reduzir a formação de estrias inclui métodos como laminação a frio e shot peening, ambos voltados para aumentar a densidade de discordâncias no material, fortalecendo a superfície e melhorando sua resistência à deformação. A laminação a frio consiste em reduzir a espessura do aço inoxidável por deformação plástica sem aquecimento, elevando a densidade de discordâncias e, assim, aumentando a dureza e a resistência à deformação, o que impede a propagação de defeitos como estrias. No *shot peening*, partículas são bombardeadas contra a superfície a alta velocidade, gerando deformações que criam compressão residual e elevam a densidade de discordâncias, contribuindo para reduzir defeitos de conformação, como estrias, ao aumentar a resistência à tração. Esses tratamentos são eficazes para aprimorar as propriedades mecânicas e a qualidade superficial do aço inoxidável, especialmente em processos como a estampagem profunda (J.CHARLES et al., 2009).

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem uma textura não uniforme, resultando em um comportamento mecânico heterogêneo. Fenômenos conhecidos como “estrias” ou *roping* do termo em inglês (vide seta na figura 24) geralmente ocorrem durante a estampagem profunda, caracterizando-se pela formação de pequenas ondulações alongadas na direção de um esforço trativo. Os aços ferríticos estabilizados são menos propensos ao aparecimento de estrias do que o aço AISI 430 básico. Na prática, a otimização dos parâmetros do processo pode minimizar esse problema. A composição química, com a adição de elementos como nióbio, melhora as propriedades mecânicas e a resistência à deformação, enquanto o controle rigoroso

do processo de laminação, especialmente a laminação a quente e a recristalização, favorece uma microestrutura mais uniforme, com grãos equiaxiais que reduzem a anisotropia. O tratamento térmico, como o recozimento após a laminação, é essencial para eliminar tensões internas e promover homogeneidade microestrutural, o que também diminui a formação de estrias. Além disso, o ajuste da microtextura, como a presença de texturas de cisalhamento, pode ser controlado durante o processamento para minimizar ainda mais esse defeito. Esses fatores combinados são fundamentais para assegurar a qualidade e o desempenho do material em aplicações específicas. (J.CHARLES et al., 2009).

**Figura 24 - Copo trefilado profundo de grau AISI 430 mostrando o fenômeno “roping”.**



Fonte: J.CHARLES et al., 2009.

Em resumo, o aumento na deformação durante o processo de laminação a frio tende a ocasionar um impacto positivo na microestrutura e na textura do aço inoxidável ferrítico, quando comparado à deformação ocorrida durante a laminação a quente. Essas descobertas têm implicações importantes para a otimização dos processos de fabricação e para a obtenção de propriedades mecânicas e estruturais desejadas.

### **3.7.2 Anisotropia**

Durante o processo de estampagem ou de tratamentos térmicos de recozimento, a chapa metálica pode apresentar comportamento anisotrópico como resultado de sua textura, que é o modo de distribuição das orientações dos cristais que formam o

material. Essa variação das propriedades com a direção caracteriza a natureza anisotrópica do metal. Como exemplo, para a formação de um copo por estampagem a partir de uma chapa é possível destacar um efeito negativo de formação de orelhas e a estricção das regiões laterais adjacentes ao fundo do corpo. Por outro lado, pode-se observar um efeito positivo com o aumento de resistência na direção perpendicular da chapa, que reduz a possibilidade de ruptura no afinamento da espessura. Em virtude desta situação, é preciso analisar a relação entre a estampabilidade e os coeficientes de anisotropia (HAMADA, J., et al., 2009).

A estampabilidade é a capacidade de uma chapa poder ser estampada sem o aparecimento de rupturas. Isso depende da resistência ao afinamento da chapa durante o processo de estampagem. A partir de um ensaio de tração é possível avaliar, mesmo que prematuramente, a anisotropia de um material e assim, avaliar resistência oferecida à deformação nas diferentes direções do plano (PADILHA; GUEDES, 1994).

O coeficiente de anisotropia plástica (R) é definido como o quociente entre a deformação verdadeira na largura e na espessura do corpo de prova ensaiado, equação (3):

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (3)$$

Onde: R = coeficiente de anisotropia normal,  $\varepsilon_w$  = deformação verdadeira na largura e  $\varepsilon_t$  = deformação verdadeira na espessura.

Como a deformação na espessura é muito pequena, sua medição está sujeita a um erro expressivo, pela lei da conservação do volume, pode-se reescrever a equação 3 da seguinte forma, equação (4):

$$R = - \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_w + \varepsilon_l} \quad (4)$$

Sendo as deformações obtidas conforme expresso pelas equações (5) e (6):

$$\varepsilon_w = \ln \left( \frac{w_0}{w_f} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_w + \varepsilon_l = \ln \left( \frac{w_0 \cdot w_f}{l_0 \cdot w_0} \right) \quad (6)$$

Onde:  $w_0$  = largura inicial do corpo de prova,  $w_f$  = largura final do corpo de prova,  $l_0$  = comprimento inicial e  $\varepsilon_l$  = deformação no comprimento

sendo a equação final para o cálculo do coeficiente de anisotropia, equação (7):

$$R = \frac{\ln \left( \frac{w_0}{w_f} \right)}{\ln \left( \frac{l_f \cdot w_f}{l_0 \cdot w_0} \right)} \quad (7)$$

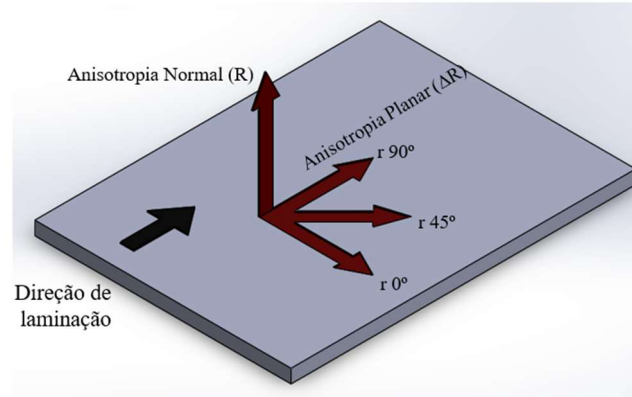
Como as propriedades mecânicas da chapa podem variar nas diferentes direções do plano, é importante que se faça uma relação do comportamento de deformação a longo do plano. Desta forma, o coeficiente de anisotropia normal é determinado com base nas direções paralelas a 0°, transversal a 90° e a 45° da direção de laminação, sendo o coeficiente de anisotropia médio,  $\bar{R}$ , definido pela equação 8 (BASTOS, 2009).

$$\bar{R} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (8)$$

Quanto maior for o coeficiente de anisotropia normal médio ( $\bar{R}$ ) melhor tende a ser a estampabilidade de um material. Como exemplo, tem-se o aço AISI 430 em que o ideal é que se atinja um valor de  $\bar{R}$  superior a 1,3 para possibilitar um bom desempenho em operações de embutimento, sendo o aumento deste coeficiente dependente da textura cristalográfica do material, que sofre influência do teor de carbono, além do nióbio e titânio como elementos estabilizadores (GUIDA., et al., 2006).

Na figura 25 é exibido um esquema para a retirada dos corpos de prova de tração para a medição da anisotropia.

**Figura 25 - Representação das principais direções avaliadas para o cálculo da anisotropia plástica.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Um coeficiente de anisotropia normal unitário demonstra resistência à deformação no plano da chapa igual à deformação na direção da espessura da chapa, ou seja, isotropia. Se a resistência na direção da espessura é maior que a média da resistência nas diferentes direções do plano da chapa, a relação de deformação média é maior que a unidade. Neste caso o material é resistente ao afinamento. Em geral, o coeficiente de anisotropia normal médio  $\bar{R}$  está diretamente relacionado com a profundidade do embutimento, quanto mais alto o valor de  $\bar{R}$  mais profundo será o embutimento (ROCHA, 2006).

A possibilidade de formação de orelhas na estampagem da chapa, por sua vez, está associada ao coeficiente de anisotropia planar “ΔR” estabelecido pela equação 9:

$$\Delta R = \frac{r_{0^\circ} + r_{45^\circ} - 2r_{90^\circ}}{2} \quad (9)$$

Evidentemente, tanto o coeficiente médio  $\bar{R}$  como o coeficiente planar  $\Delta R$  dependem da textura da chapa laminada. Se a chapa apresenta ausência de textura, isto é, se contiver grãos orientados ao acaso, ela é perfeitamente isotrópica e, então, tem-se  $R_{0^\circ} = R_{45^\circ} = R_{90^\circ} = 1$  sendo  $\bar{R}=1$  e  $\Delta R=0$ . Se a chapa apresentar um determinado

grau de texturização, ou seja, se contiver uma certa proporção de grãos orientados preferencialmente segundo determinadas direções, pode-se ter  $\bar{R} > 1$  onde a direção de maior resistência é a perpendicular ao plano da chapa, sendo no caso contrário  $\bar{R} < 1$  (HAMADA, J., et al., 2009).

Então, para se chegar a uma melhor condição de estampabilidade, deve-se procurar obter na fabricação da chapa por laminação valores elevados de anisotropia normal média e valores baixos para a anisotropia planar (BRESCHIANI et al., 2011).

Importante relatar ainda o fato de que a textura formada depende de variáveis de processamento como: temperatura final da laminação a quente, temperatura de bobinamento, quantidade de deformação experimentada durante a laminação a frio, condições de lubrificação e ciclo de recozimento. Depende ainda de variáveis do material, ou seja, do teor de alumínio e nitrogênio, no caso dos aços, do teor de outros elementos de ligas presentes, e do tamanho do grão (BRESCHIANI et al., 2011).

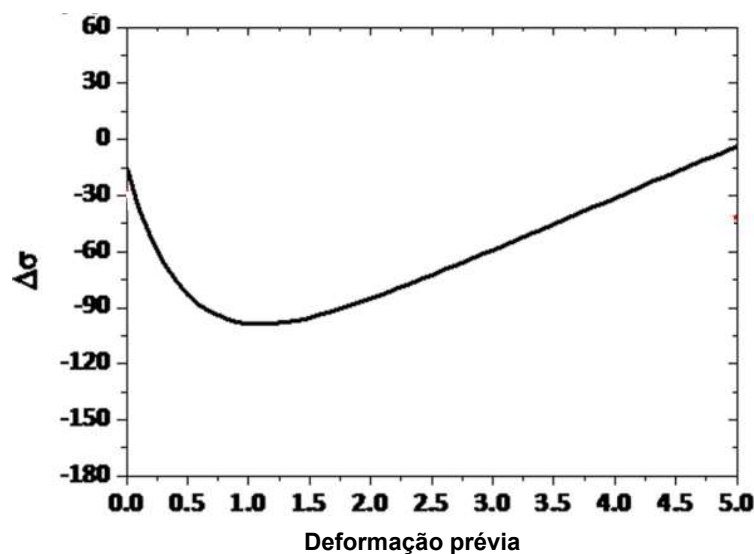
### **3.7.3 Encruamento**

O encruamento ocorre quando o material se torna mais resistente mecanicamente em função da deformação plástica, devido ao aumento da densidade de discordâncias acumuladas. Esse acúmulo de discordâncias tende a elevar a resistência ao escoamento com o aumento da deformação prévia, embora essa relação possa variar conforme o material e as condições do processo. O encruamento atua como um mecanismo oposto ao efeito Bauschinger, observado quando um material previamente deformado sob tração apresenta uma tensão de escoamento reduzida ao ser submetido a uma carga compressiva subsequente. Esse comportamento é atribuído à mobilização das discordâncias formadas durante a deformação inicial, que influenciam a resposta do material após a inversão do carregamento mecânico (KIM, J et al., 2019).

Kim, J et al. (2019) realizaram esse estudo baseado em aços utilizados em tubulações, especialmente para aplicações que exigem alta resistência e durabilidade, como em oleodutos e gasodutos. Onde se definir alguns fatores, principalmente a resistência ao escoamento. É possível observar a relação entre a tensão de escoamento e a

deformação prévia, evidenciando o comportamento "down-and-up" que caracteriza o efeito Bauschinger. Em níveis baixos de deformação prévia, a resistência ao escoamento é reduzida devido ao efeito Bauschinger, enquanto em níveis mais altos, a resistência aumenta à medida que o endurecimento por deformação se torna predominante (figura 26).

**Figura 26 - variação da resistência ao escoamento ( $\Delta\sigma$ ) em função da deformação prévia**



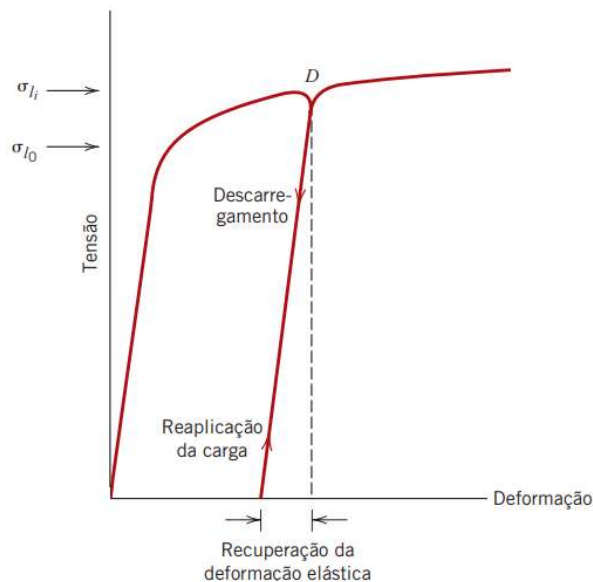
Fonte : Kim, J et al., (2019) (Modificado)

O efeito Bauschinger ocorre em materiais sujeitos a ciclos de carga e descarga, resultando inicialmente na redução da resistência ao escoamento devido à interação entre as discordâncias acumuladas e o estresse de retrocesso. Esse fenômeno provoca uma diminuição temporária na resistência do material. Entretanto, após uma deformação de aproximadamente 1% a 1,5%, o endurecimento por deformação começa a prevalecer, estabilizando a curva tensão-deformação e fazendo com que a resistência ao escoamento volte a aumentar. Esse comportamento é crucial para entender a performance de materiais em processos de conformação e estampagem, onde é necessário evitar falhas e deformações indesejadas (KIM, J et al., 2019).

Na figura 27 é mostrado o fenômeno do encruamento por meio de uma curva tensão-deformação. A princípio, o metal é deformado plasticamente até o ponto D, observando-se nesta curva o limite de escoamento ( $\sigma_{l0}$ ). Na sequência, a tensão é liberada e aplicada novamente resultando em um novo limite mais elevado de

escoamento ( $\sigma_{li}$ ), o que mostra que o material se tornou mais resistente durante a deformação (CALLISTER, 2015).

**Figura 27 - Diagrama esquemático tensão-deformação em tração mostrando os fenômenos de recuperação da deformação elástica e de encruamento.**



**Fonte: CALLISTER, 2015**

A expressão da lei de potência ou equação de Ludwik-Hollomon permite relacionar o encruamento com a tensão verdadeira ( $\sigma_v$ ) durante a tração.

$$\sigma_v = K \epsilon_v^n \quad (10)$$

Onde K é a constante de resistência do material n, denominado expoente de encruamento, e  $\epsilon_v$  é a deformação verdadeira.

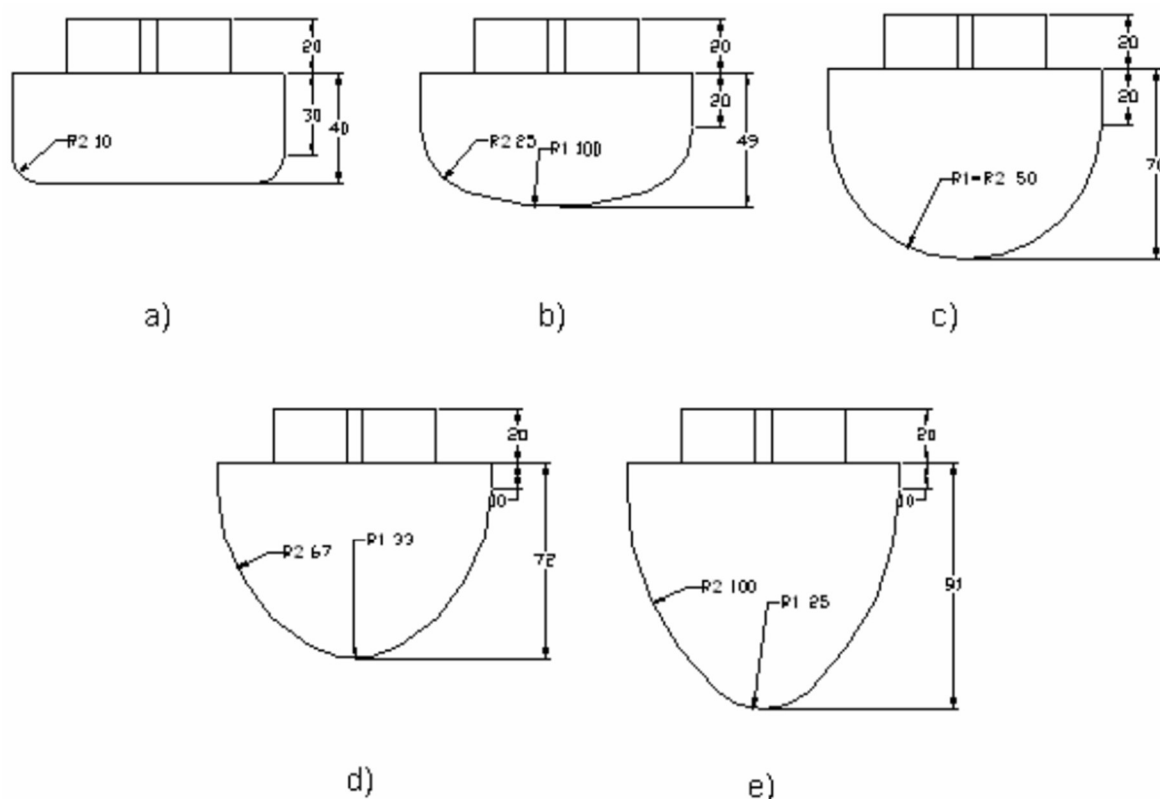
A capacidade de alongamento de cada material depende do trabalho mecânico a frio. O expoente de encruamento “n” define essa capacidade, que pode ser representado em uma curva tensão-deformação cisalhante. Em materiais com elevado coeficiente de encruamento, a deformação localizada causa um aumento da resistência mecânica e o material se torna resistente com o acréscimo da deformação. Já em materiais de pequeno coeficiente de encruamento, a deformação localizada causa uma estricção e uma perda da resistência mecânica (MESQUITA, 1997).

### 3.7.4 Raio e formato do punção

A geometria dos punções desempenha um papel relevante na conformação de chapas metálicas, pois influencia diretamente a conformabilidade de um material e o sucesso dos processos de estampagem. Um *design* bem planejado favorece uma deformação com a consequente redução de defeitos e a melhoria da qualidade do produto final. Elementos como ângulos e transições suaves nas superfícies de contato com a chapa podem facilitar o escoamento do material, especialmente em materiais com menor ductilidade. Além disso, a escolha de geometrias apropriadas pode contribuir para a preservação das ferramentas e a eficiência do processo, tornando a fabricação mais estável e econômica. (CHEMIN FILHO E MARCONDES, 2009; BOUCHAALA, K. et al., 2021).

Chemin Filho e Marcondes (2009) fez um estudo sobre a influência da geometria do punção na conformação de chapas de aço carbono laminada a frio, conforme a figura 28 ele realizou testes como as diferentes geometrias de punção (cilíndrico, elíptico raso, elíptico profundo e elíptico extra profundo) afetam a conformabilidade dos materiais testados. Os resultados mostram que a forma do punção influencia diretamente a distribuição de tensões e a deformação verdadeira nos materiais.

**Figura 28 - Geometria do punção e raios de congruência de cada ferramenta – diâmetro de 100 mm**



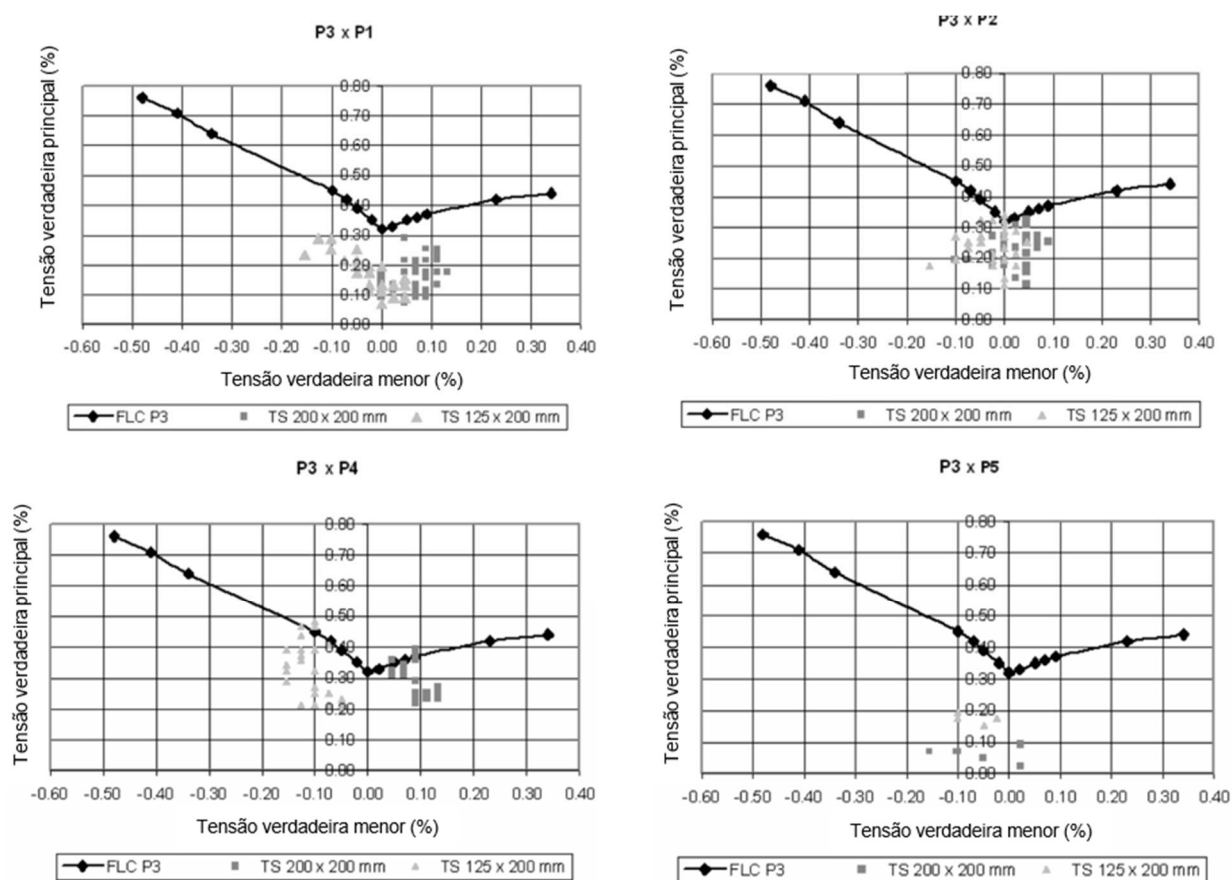
**a)** punção cilíndrica (P1), **b)** punção elíptica rasa (P2), **c)** punção hemisférica (P3), **d)** punção elíptica profunda (P4) e **e)** punção elíptica extraprofunda (P5).

**Fonte: Chemin Filho e Marcondes, 2009**

A figura 29 compara diferentes geometrias de punção (cilíndrico P1, elíptico raso P2, elíptico profundo P4 e elíptico extra profundo P5) e seu impacto nos pontos de deformação verdadeira, destacando como cada modelo distribui a carga sobre o material. O termo "TS" refere-se a "*test specimens*" no contexto do artigo. Ele é utilizado para designar os diferentes tipos de amostras que foram avaliadas durante os testes experimentais. No estudo, foram utilizados dois tipos de espécimes de teste: um com dimensões de 200 x 200 mm, destinado a condições de estiramento, e outro com dimensões de 125 x 200 mm, destinado a condições de aprofundamento. Esses espécimes foram testados com as diferentes geometrias de punção para analisar a conformabilidade do material. À medida que o raio do punção aumenta, como no caso do punção hemisférico (P3), a área de distribuição de carga também se amplia, criando condições de estampagem mais uniformes, permitindo uma distribuição mais homogênea da deformação plástica (CHEMIN FILHO E MARCONDES, 2009).

A análise dos pontos de deformação verdadeira mostra que a geometria do punção afeta significativamente a conformabilidade do material, com o punção hemisférico superando outros modelos. Além disso, punções com raios menores (P4 e P5) promovem maior concentração de força na ponta, o que favorece a caracterização de modos de deformação específicos, como o aprofundamento e o estiramento (CHEMIN FILHO E MARCONDES, 2009).

**Figura 29 - Comparação de deformação real (FLC) de acordo com Nakazima**



a) punção cilíndrica (P1), b) punção de elipse rasa (P2), c) punção de elipse profunda (P4) e d) punção de elipse extra profunda (P5).

**Fonte: Chemin Filho e Marcondes, 2009**

O estudo de Chemin Filho e Marcondes (2009) sugere que a seleção do punção ideal depende das condições específicas do processo de estampagem e das características desejadas para o material. No entanto, algumas conclusões importantes podem ser extraídas:

- punção Hemisférico (P3): Esse modelo é notável por proporcionar uma distribuição de carga mais uniforme sobre o material, resultando em melhores

condições de estampagem e maior conformabilidade. Os pontos de deformação verdadeira alcançados com esse punção foram os mais altos, indicando que ele pode ser eficaz para maximizar a conformabilidade do material.

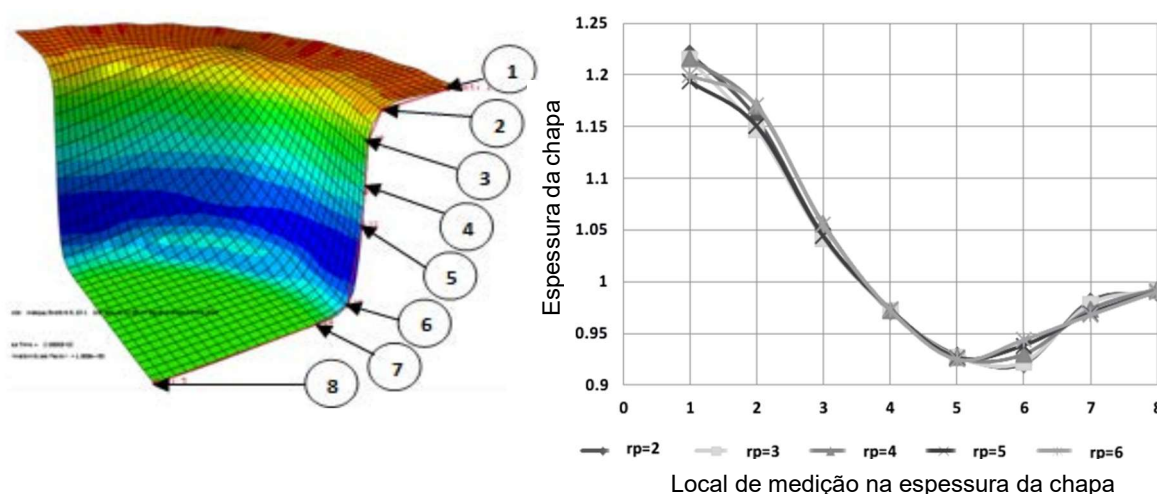
- punção Elíptico Profundo (P4): Esse modelo também demonstrou resultados promissores, alcançando limites de conformabilidade semelhantes aos do punção hemisférico. A concentração de tensões na região da ponta do punção pode ser vantajosa em determinados contextos, permitindo uma definição precisa dos modos de deformação.
- Considerações sobre Geometria: O artigo destaca que a geometria do punção impacta significativamente a estampabilidade e o comportamento do material durante o processo. Portanto, a escolha do punção deve considerar não apenas a forma, mas também as dimensões e o tipo de material a ser trabalhado.

O punção hemisférico (P3) é geralmente considerado a melhor opção para conformabilidade, enquanto o punção elíptico profundo (P4) também pode ser uma escolha adequada dependendo das especificidades do processo. A seleção ideal deve ser baseada nas necessidades do projeto e nas propriedades do material.

ZEIN, H et al. (2013) realizaram um estudo com simulação numérica sobre o efeito dos parâmetros de projeto da matriz no afinamento da chapa metálica (aço de baixo carbono modelado como um material elástico e plástico com elasticidade isotrópica e critério de escoamento anisotrópico) no processo de estampagem profunda. O artigo examina a influência do raio do punção na conformação, destacando a importância desse parâmetro para a qualidade do produto final. A pesquisa revela que o raio do punção deve ser maior que três vezes a espessura do blank para garantir uma conformação adequada. Quando o raio do punção é menor que esse valor, o afinamento do material aumenta significativamente, o que pode levar a falhas na estrutura do copo formado. Essa relação crítica entre o raio do punção e a espessura do material é fundamental para evitar problemas durante o processo de estampagem. Além disso, o artigo demonstra que, ao utilizar raios do punção superiores a três vezes a espessura do blank, o afinamento do material se torna mais estável. Isso sugere que um raio maior ajuda a distribuir melhor as tensões durante a conformação, reduzindo o risco de falhas e melhorando a integridade do produto. A escolha do raio do punção,

portanto, não apenas afeta a força necessária para o processo, mas também influencia a distribuição de espessura do material, o que é crucial para a qualidade do produto. As observações são apoiadas por dados experimentais e figuras que ilustram a variação do afinamento em relação ao raio do punção, evidenciando a importância do design do punção na otimização do processo de estampagem profunda. Na figura 30 é mostrada a distribuição da espessura do metal da chapa em relação a diferentes valores do raio do punção. Essa figura ajuda a visualizar como a espessura do material varia com diferentes raios do punção.

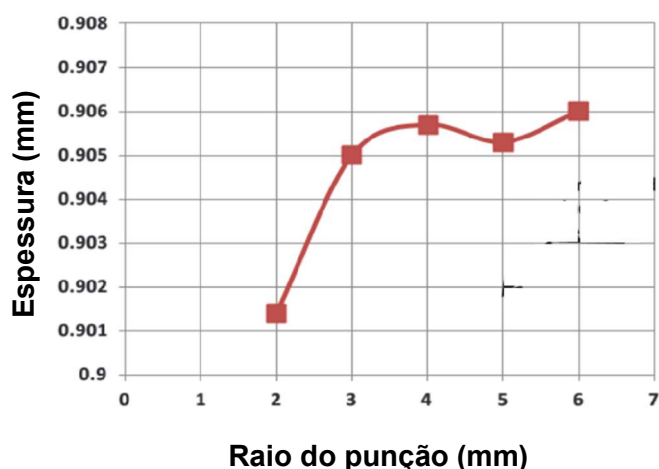
**Figura 30 - Distribuição da espessura do material simulado (aço de baixo carbono) com diversos valores do raio do punção ( $r_p$ , mm)**



Fonte: ZEIN, H et al., 2013

A figura 31 lustra a variação do afinamento do metal da chapa com diferentes valores do raio do punção. Essa figura é crucial para entender como o afinamento se comporta em relação ao raio do punção, destacando que raios menores que três vezes a espessura do blank resultam em maior afinamento e possíveis falhas (ZEIN, H et al., 2013).

**Figura 31 - Variação do afinamento da chapa em simulação (aço de baixo carbono) com diferentes valores do raio do punção (rp)**



Fonte: ZEIN, H et al., 2013

A tabela 3 apresenta a distribuição da espessura do metal da chapa em diferentes locais para vários valores do raio do punção. Os dados nesta tabela fornecem uma visão quantitativa da espessura em diferentes condições experimentais (ZEIN, H et al., 2013).

**Tabela 3 - Efeito do raio do punção (rp) na distribuição da espessura da chapa simulada (aço de baixo carbono).**

| Ponto de medição de espessura (mm) | Raio do punção (mm) |        |        |        |        |
|------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|
|                                    | 2                   | 3      | 4      | 5      | 6      |
| 1                                  | 1,2208              | 1,2147 | 1,2157 | 1,1942 | 1,2002 |
| 2                                  | 1,1580              | 1,1470 | 1,1697 | 1,1510 | 1,1710 |
| 3                                  | 1,0443              | 1,0414 | 1,0560 | 1,0441 | 1,0551 |
| 4                                  | 0,9717              | 0,9724 | 0,9723 | 0,9736 | 0,9734 |
| 5                                  | 0,9286              | 0,9272 | 0,9268 | 0,9265 | 0,9250 |
| 6                                  | 0,9203              | 0,9223 | 0,9296 | 0,9383 | 0,9440 |
| 7                                  | 0,9812              | 0,9786 | 0,9732 | 0,9695 | 0,9680 |
| 8                                  | 0,9890              | 0,9914 | 0,9927 | 0,9904 | 0,9907 |
| Média                              | 1,0267              | 1,0244 | 1,0295 | 1,0234 | 1,0284 |

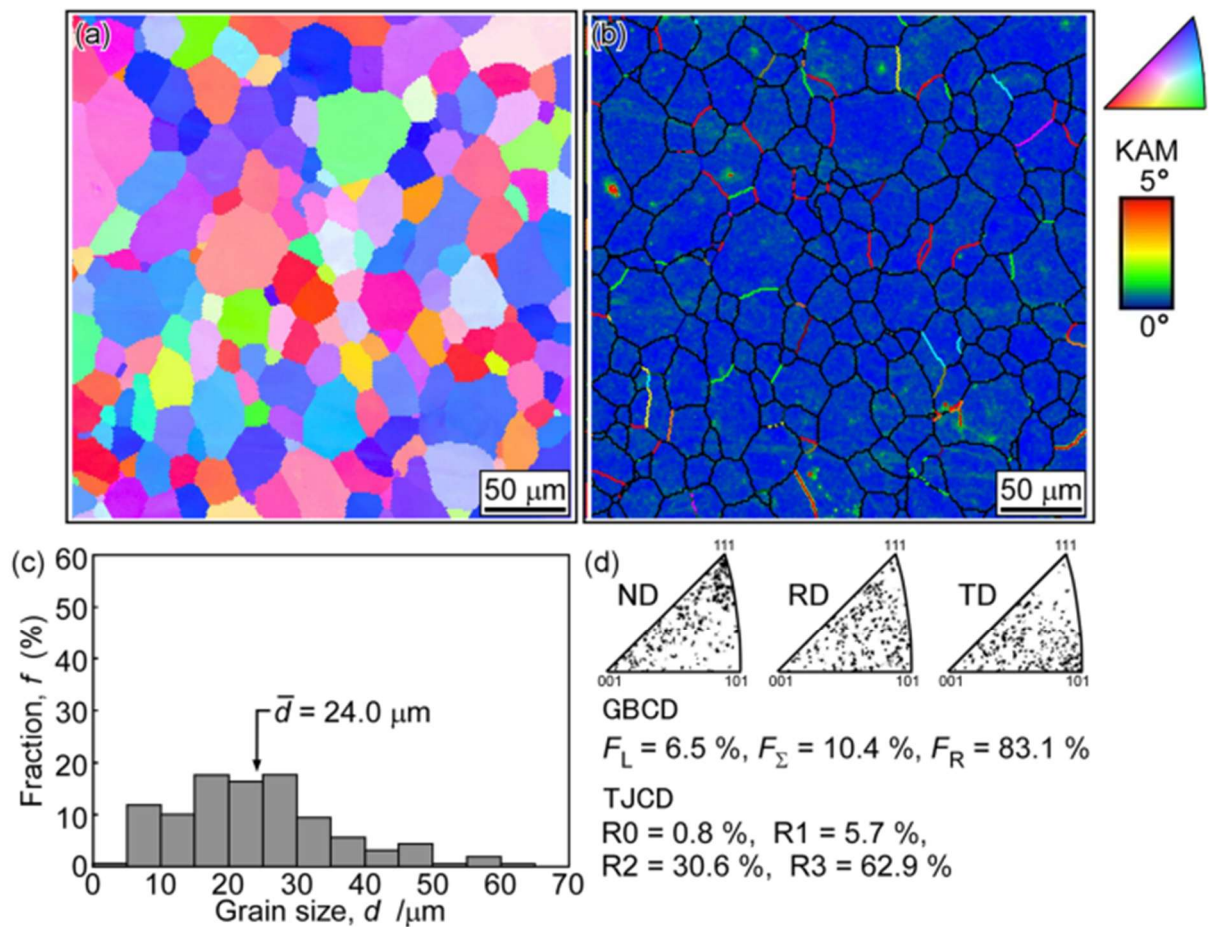
Fonte: ZEIN, H et al., 2013 (adaptada)

### 3.8 Textura

O ensaio de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD) é comumente utilizado para o estudo da orientação cristalográfica, textura, de um material. A técnica é especialmente útil para estudar a relação entre a microestrutura e as propriedades físicas e mecânicas dos materiais, o que é fundamental para o desenvolvimento de novos materiais e a otimização de processos industriais.

Kobayashi, Shigeaki et al. (2024) conduziram um estudo utilizando o ensaio de EBSD para avaliar os contornos de grão de baixo ângulo e o controle de textura após as operações de laminação e recozimento, visando melhorar a resistência à corrosão e à fadiga do aço inoxidável ferrítico tipo 436L. Como mostrado na figura 32, o material possui uma microestrutura homogênea composta por grãos de ferrita recristalizados, com tamanho médio de grão de 24,0  $\mu\text{m}$  e uma orientação fraca para o plano (111) na superfície, conforme mostrado nas figuras 32a–d. Essa caracterização inclui o Mapa de Orientação da figura de Polo inverso (IPF), o Mapa de Características das Fronteiras de Grãos (GBCD) e o mapa de distribuição dos valores de KAM, que evidenciam o desalinhamento médio entre os grãos. A amostra apresenta 83% das fronteiras de grãos distribuídas de modo aleatório, indicando uma estrutura predominantemente isotrópica.

**Figura 32 - Microestrutura inicial do espécime produzido pelo recozimento da chapa de aço inoxidável 436L laminada a frio conforme recebida.**



(a) Mapa índice de padrão de fase IPF (b) mapa dos contornos de grão (c) distribuição do tamanho de grão (d) figuras de polos inversas.

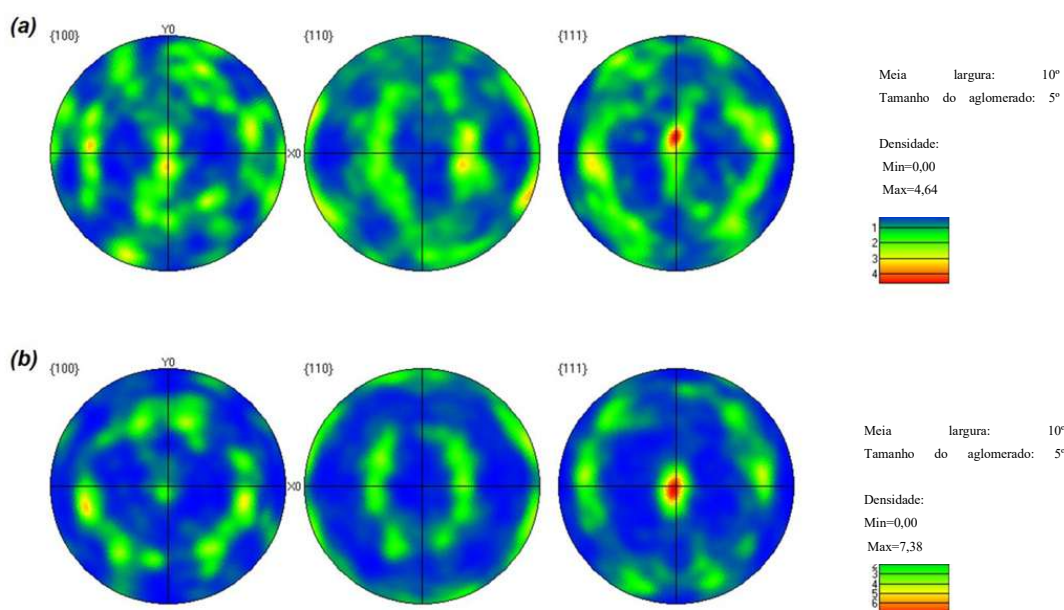
**Fonte: KOBAYASHI et al., 2024.**

NÚÑEZ, A. et al. (2024) em outro estudo avaliaram o comportamento em estampagem profunda do aço inoxidável ferrítico AISI 430 modificado, que possui maiores teores dos elementos estabilizadores de ferrita, como Si e Cr, e menores teores dos elementos estabilizadores de austenita, como C, N e Mn. As amostras foram divididas em AISI 430 padrão (denominado 0A) e AISI 430 modificado (denominado 1C). Na figura 33 a-b, as imagens de polo obtidas por EBSD mostram que as amostras recozidas (0A e 1C) exibiram uma distribuição de polos característica do aço AISI 430, composta pelas projeções nos planos (100), (110) e (111). Observa-se um acúmulo significativo de polos na direção  $\langle 111 \rangle$  (111), sendo este acúmulo mais intenso na amostra 1C. A intensidade da textura na amostra 0A foi aproximadamente 4,6 vezes maior que a distribuição aleatória de orientações, enquanto na amostra 1C foi de 7,4

vezes, indicando uma textura notavelmente mais forte em 1C. Isso sugere um grau mais avançado de recristalização e uma orientação preferencial mais bem definida no aço AISI 430 modificado, conferindo-lhe características estruturais específicas como uma textura cristalina mais forte em comparação com a amostra padrão (0A), evidenciada por altos acúmulos de polos em direções específicas, como  $\langle 111 \rangle$ , o que indica uma orientação preferencial mais bem definida, um refinamento da microestrutura que diminui o tamanho dos grãos, otimizando as propriedades mecânicas do material, como resistência e ductilidade. A análise também mostrou que a distribuição dos tamanhos de grãos na amostra 1C é mais favorável, contribuindo para a sua melhor conformabilidade durante processos de estampagem profunda.

De acordo com NÚÑEZ, A. et al. (2024) o mapa das figuras de polo, IPF, da amostra 0A não apresenta uma orientação preferencial dos grãos após o recozimento, sugerindo uma distribuição mais aleatória das orientações cristalográficas. Em contraste, o mapa da figura de polo da amostra 1C revelou uma orientação preferencial em torno do plano (111), indicando que os grãos da amostra 1C têm uma recristalização mais bem definida e texturas preferenciais mais pronunciadas em comparação com a amostra 0A (figura 33).

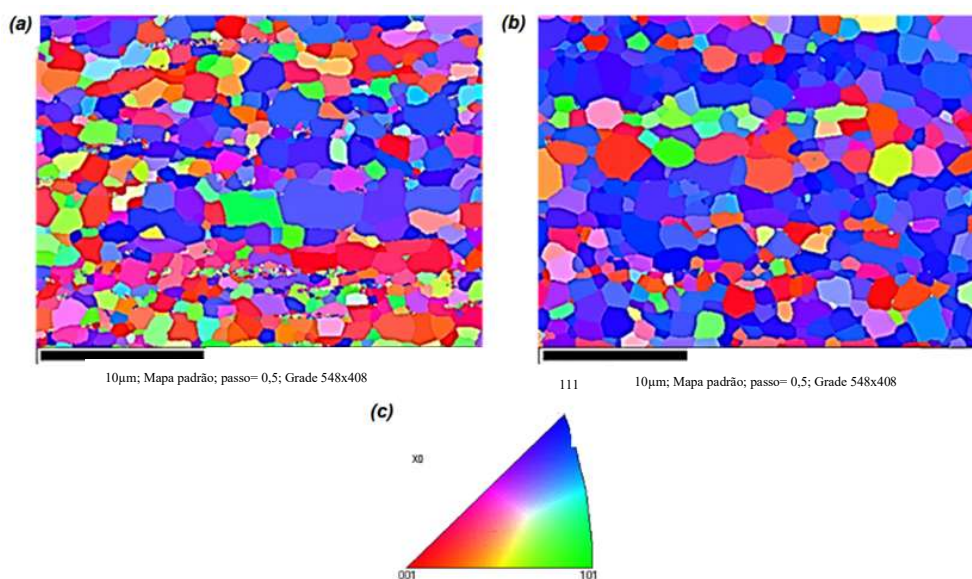
**Figura 33 - Figuras de polo das amostras recozidas do aço inoxidável AISI 430**



a) padrão, 0A , b) modificada, 1C.

Fonte: Núñez. A. et al., 2024

**Figura 34 - Mapa de orientação (IPF) da projeção Z da superfície da amostra**



a) padrão - 0A, b) modificada - 1C, c) mapa de cores da figura do polo inverso.

**Fonte: Núñez. A. et al., 2024**

A figura 34 ajuda a quantificar a evolução da textura cristalina das amostras após o recozimento, evidenciando claramente como a modificação na composição do aço influencia suas propriedades microestruturais. A figura fornece uma visualização das orientações cristalinas dos grãos presentes na amostra. Cada cor no mapa representa uma orientação específica dos grãos em relação a uma referência de direção, que neste caso é a direção normal à superfície do espécime. Para a amostra 0A, observa-se uma distribuição aleatória das orientações dos grãos, indicando a ausência de uma orientação cristalina preferencial. Isso sugere que, após o recozimento, a microestrutura desta amostra não se organizou de forma significativa, resultando em uma textura menos definida. Em contraste, a amostra 1C exibe uma concentração maior de orientações de grãos favorecidas, especialmente nas direções associadas ao plano (111), que é indicado pela coloração e distribuição dos grãos. Isso indica que a amostra 1C desenvolveu uma textura mais robusta após o recozimento, refletindo melhoras nas características mecânicas e na conformabilidade do material. As diferenças observadas entre as duas amostras (0A e 1C) em termos de distribuição de orientações sugerem que a amostra 1C possui um potencial superior para aplicações que exigem uma boa resistência à deformação e conformabilidade, o que é crucial em processos de moldagem (NÚÑEZ, A. et al., 2024).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi dividido em quatro etapas, que consistiram na preparação dos corpos de prova, caracterização do material com ensaios mecânicos e análise estrutural antes e após a estampagem do aço AISI 444.

4.1 Material

Para a execução dos ensaios foi utilizado o aço inoxidável ferrítico AISI 444 no estado laminado a frio com espessura de 1,5mm (recebido no estado recozido). Na tabela 4 é mostrada a composição química deste material.

Tabela 4 - Composição química do aço AISI 444 (% em peso)

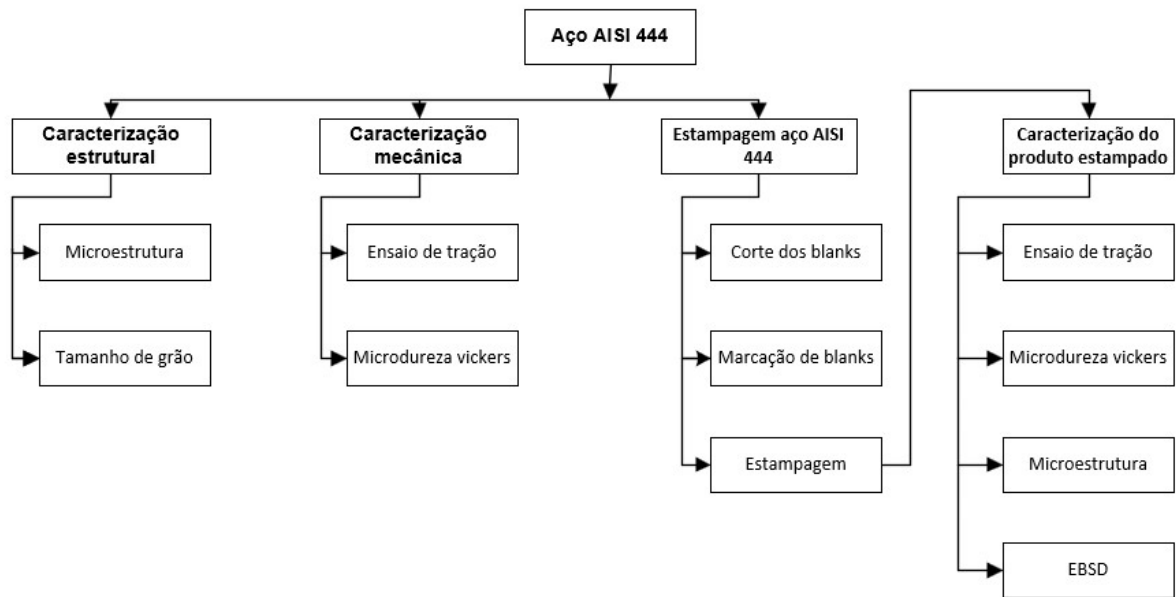
|        |        |        |        |        |         |
|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| C      | Mn     | Si     | P      | S      | Cr      |
| 0,0089 | 0,1459 | 0,5166 | 0,0308 | 0,0010 | 17,5290 |
| Ni     | Mo     | V      | Nb     | Ti     |         |
| 0,2330 | 1,7912 | 0,0284 | 0,1702 | 0,1509 |         |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.2 Fluxograma

Na figura 35 é apresentada esquematicamente a sequência experimental adotada neste trabalho, relacionando cada etapa com a sequência de realização das atividades experimentais.

**Figura 35 - Fluxograma representativo do procedimento experimental realizado**



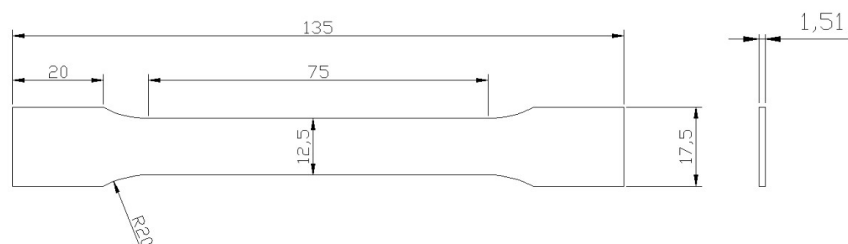
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

### 4.3 Caracterização Mecânica

#### 4.3.1 Ensaio de tração

A caracterização mecânica do aço inoxidável AISI 444 no estado como recebido foi realizada por meio de ensaios de tração, conforme a norma ABNT NBR 6892 (figura 36). Para esse fim, foram confeccionadas três amostras para cada direção de corte em relação à direção de laminação da chapa (DL): 0°, 45° e 90°. Os parâmetros avaliados nos ensaios foram o limite de escoamento (LE), o limite de resistência à tração (LRT) e o alongamento uniforme (AU), com o objetivo de investigar a anisotropia do material e sua influência nas propriedades mecânicas.

**Figura 36 - Desenho técnico do corpo de prova adotado para os ensaios de tração.**



Fonte: ABNT NBR ISO 6892 (2018), modificado.

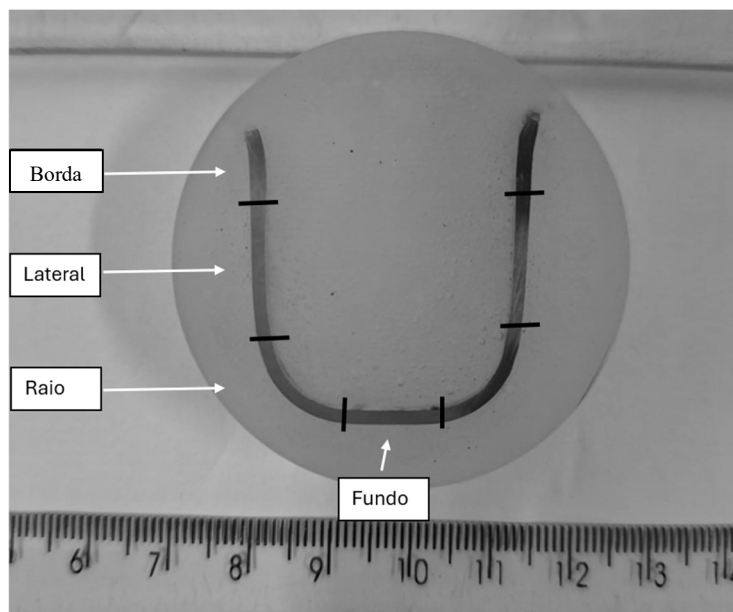
Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal Instron 5982 com sistema de aquisição de dados Blue Hill 3, com uso de extensômetro do tipo agulhas com abertura máxima de 25mm e taxa de deformação inicial de  $0,001\text{s}^{-1}$ .

#### **4.3.2 Microdureza Vickers**

O ensaio de microdureza Vickers (HV) do aço AISI 444 antes e após a estampagem foi realizado em um microdurômetro Emcotest com carga de 0,2gf e tempo de indentação de 15 segundo em amostras previamente embutidas em resina epóxi termo-endurecível que foram submetidas ao lixamento em lixadeiras Struers com uso de lixas de carbetto de silício na seguinte sequência: 120, 240, 400, 600, 1200 mesh e posterior polimento em politrizes do mesmo fabricante com a utilização de pasta de diamante de granulometria de  $9\text{ }\mu\text{m}$  e  $3\text{ }\mu\text{m}$  e ataque com o reativo químico Vilella (0,5 ml de ácido pícrico, 2,5 ml de HCl, 50 ml de  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) com imersão de 30 segundos.

Na figura 37 estão representadas as regiões do copo estampado onde foram conduzidos os ensaios de dureza Vickers após a estampagem dos copos. Essa avaliação da dureza ocorreu para os copos que usaram os diâmetros de blank de 55 mm e 60 mm, ou seja, os dois valores de diâmetro de blank que antecederam a ruptura dos copos, que aconteceu para o diâmetro de blank de 62 mm.

**Figura 37 - Indicação das regiões do copo embutido onde foi realizada a medição da dureza Vickers.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

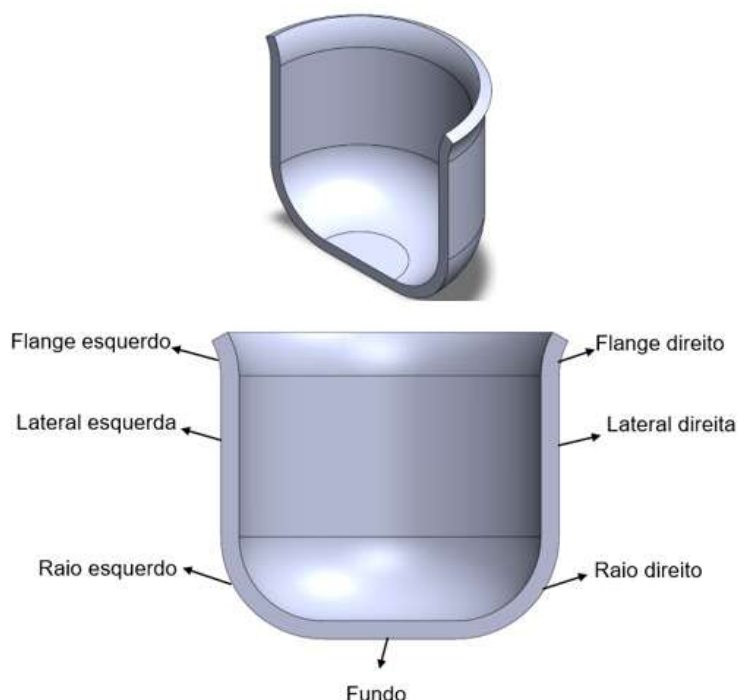
#### **4.4 Caracterização Estrutural**

##### **4.4.1 Microscopia óptica**

Para avaliar a microestrutura do material uma amostra foi embutida utilizando a resina epóxi com posterior lixamento manual com a utilização das mesmas lixas, panos de polimento e ataque químico praticados na preparação para o ensaio de microdureza Vickers. As micrografias foram obtidas com auxílio de um microscópio óptico da marca Emcotest e as imagens capturadas por meio de câmera com lentes com capacidade de aumento de 100X, 200X e 400X.

Na figura 38 estão demonstradas as regiões onde foram analisadas a microestrutura após a estampagem dos copos do aço AISI 444.

**Figura 38 - Representação do corpo de prova estampado com as respectivas regiões de análise da microestrutura.**



**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024**

O tamanho de grão foi avaliado por meio da técnica de difração de elétrons retroespalhados (EBSD), que possibilita uma análise detalhada da microestrutura, incluindo a morfologia dos grãos e a respectiva orientação cristalográfica preferencial. Essa técnica é amplamente eficaz para caracterizar o tamanho de grão em materiais metálicos (CARNEIRO, ÍRIS; SIMÕES, SÓNIA, 2020).

#### **4.4.2 Difração por elétrons retroespalhados (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 15 mm, sendo feita a detecção de grãos vizinhos a partir da desorientação de grãos com ângulo de 5°, adotando área de análise de 32330  $\mu\text{m}^2$ , tamanho de pixel de 0,32  $\mu\text{m}$  com aproximadamente 97% dos pontos indexados. Todas as análises foram realizadas na seção longitudinal em amostras com seção quadrada de lado 10 mm as quais foram lixadas com uso de lixas de 1200, 1500 e

2000 mesh, polidas com pasta de diamante com granulometrias de 2,5  $\mu\text{m}$  e 0,5  $\mu\text{m}$  e em seguida realizado o polimento vibratório durante 5 horas com uso do Buehler VibroMet 2.

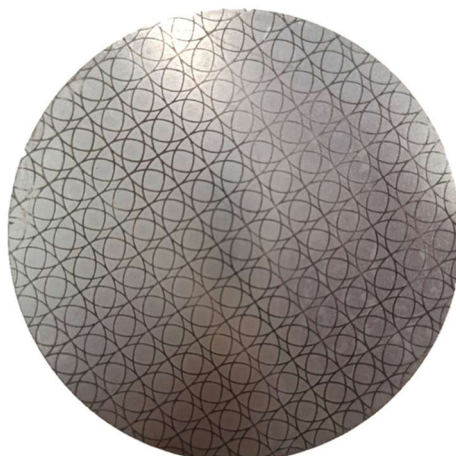
## **4.5 Estampagem**

### **4.5.1 Montagem e marcação dos blanks**

Primeiramente, os blanks de aço inoxidável AISI 444 foram obtidos por meio de corte a laser, utilizando uma máquina VITERBO modelo LV-3015, com potência de 3000 W. Os blanks circulares foram produzidos com os seguintes diâmetros: 50 mm, 55 mm, 60 mm e 62 mm, considerando o diâmetro da matriz de 30 mm e o diâmetro do punção de 25,5 mm, usados no processo de estampagem. A escolha desses diâmetros foi baseada na estimativa do Limite de Desenho Limpo (LDR) do material, previsto em aproximadamente 2,1 (REDDY, A.; et al., 2014).

Para a previsão do limite de deformação do aço AISI 444 durante a estampagem dos copos, foi inicialmente realizada a marcação de uma malha de círculos com diâmetro de 10 mm nos blanks. A marcação foi feita utilizando uma gravadora eletrolítica SL-300, com a solução gravadora C-1, que tem como princípio ativo a corrosão do metal devido à natureza ácida do ataque eletrolítico (ácido nítrico), sob corrente elétrica alternada a partir de uma fonte com tensão de 12 V. Após a gravação dos círculos, foi realizada a neutralização do ácido, utilizando água e bicarbonato de sódio, com o objetivo de interromper o processo de corrosão dos blanks Figura 39.

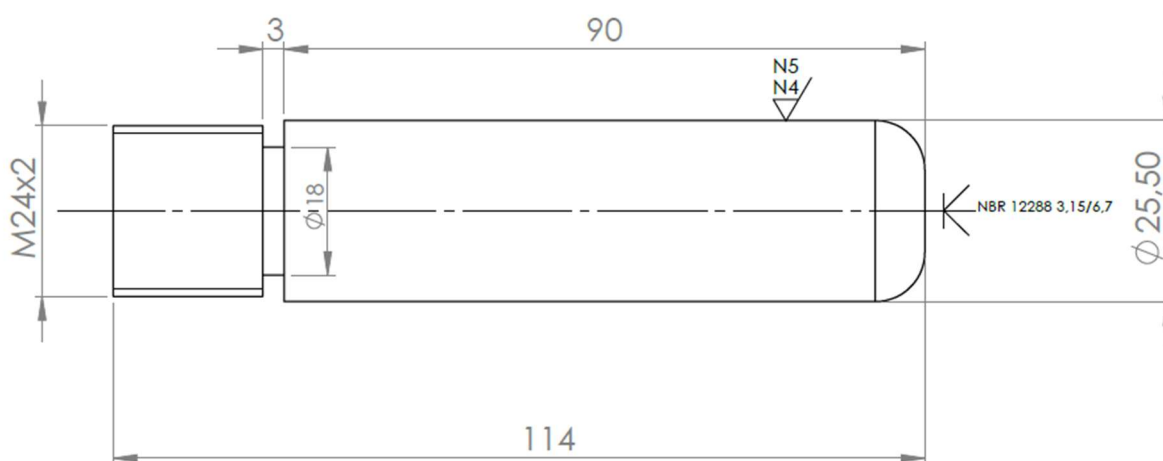
**Figura 39 - Corpo de prova (Blank) após gravação da malha de referência.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A estampagem foi feita com uso de uma matriz com diâmetro de 30 mm e raio de 7,0 mm, adotando punção com diâmetro de 25,5mm e raios de 7,0 mm e 8,0 mm, conforme desenho técnico mostrado na figura 40.

**Figura 40 - Desenho do punção usado para realização da estampagem.**



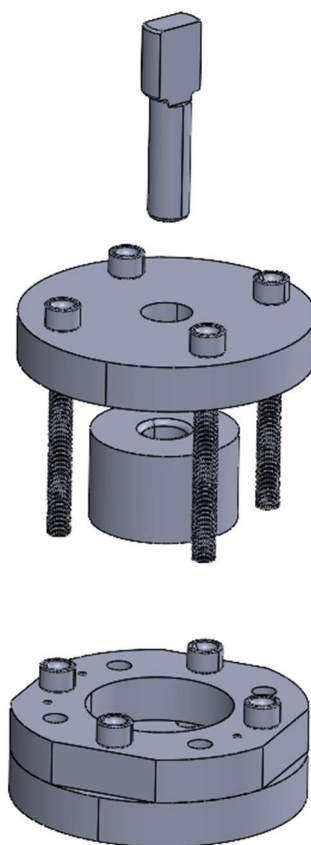
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para a realização da estampagem foi utilizada uma máquina de ensaios universais EMIC com capacidade máxima de carga igual a 300kN onde a matriz de estampagem, figura 41, foi montada para efetuar a estampagem dos copos do aço AISI 444, adotando velocidade de deslocamento do punção para executar a estampagem, 7 mm/min, além do ajuste do torque de 30 N.m aplicado igualmente em 8 parafusos M8 do prensa chapas com uso do torquímetro Gedore modelo flex-o-click L120 com

capacidade de 30Nm a 160Nm. Por fim, destaca-se o uso do bissulfeto de molibdênio como lubrificante dos blanks e nos componentes da matriz utilizados na estampagem, ou seja, a matriz, o prensa-chapas e o punção.

A previsão do valor da razão limite de estampagem, LDR, considerou o previsto no ensaio Swift, ou seja, a razão entre o último valor de diâmetro do blank que não apresentou fratura pelo diâmetro da matriz, no caso desse experimento, 30 mm. Deve-se frisar que os experimentos não utilizaram o método Swift, que usa um punção de 50 mm, (SILVA et al., 2016).

**Figura 41 - Matriz usada nos testes de estampagem**



**Fonte: Mozart, 2022**

Após a estampagem, os círculos, que inicialmente tinham 10 mm de diâmetro, assumiram a forma de elipses devido à deformação sofrida pelo aço AISI 444 durante a operação de estampagem, com o maior alongamento da elipse ocorrendo na lateral dos copos. O aspecto assumido pela malha mostra o estado de deformação que o material sofreu. Após a deformação, foram realizadas medições nos corpos de prova,

registrando-se os valores dos eixos maior e menor das elipses formadas. As elipses nos pontos de maior deformação foram medidas (vide indicação de uma elipse por meio da marcação mostrada na figura 42), e, a partir dessas medições, as deformações maior e menor foram calculadas para gerar a curva limite de conformação.

**Figura 42 - Corpo de prova com a formação de elipses após conformação**



**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

Para a medição das profundidades interna, uma máquina tridimensional da marca MITUTOYO, modelo QM-Data 300-10, com resolução de 0,0005mm foi utilizada, como mostrado na figura 43.

**Figura 43 - Medição da profundidade interna do blank estampado**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

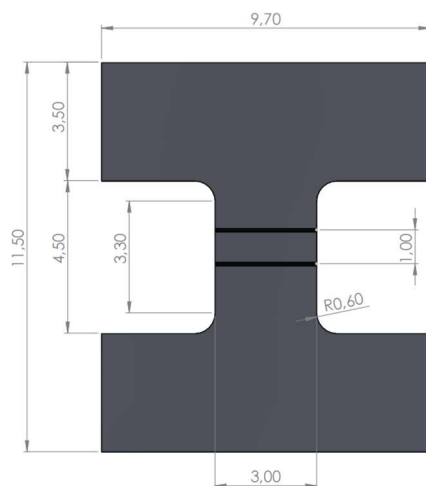
#### **4.5.2 Caracterização Mecânica dos copos estampados**

##### **4.5.2.1 Ensaios de micro tração**

Com o objetivo de realizar a caracterização mecânica do produto estampado, foram confeccionados 10 corpos de prova para ensaio de tração, figura 44, obtidos a partir do recorte de amostras retiradas da lateral dos copos estampados, figura 45, utilizando o processo de eletroerosão a fio. A camada branca gerada nesse processo foi removida manualmente com o uso de lima agulha, a fim de evitar interferências nos resultados. O ensaio de microtração foi realizado em uma máquina de ensaios universais Shimadzu modelo AGX, com taxa de deformação inicial de 0,001/s.

Com o objetivo de obter a medida de parâmetros de resistência mecânica e de ductilidade foi feito o cálculo da tensão limite de resistência à tração, como adotado no ensaio de tração convencional, e para a identificação de um parâmetro de ductilidade, considerando que não foi utilizado nos experimentos um extensômetro, fez-se a marcação de dois traços, espaçados entre si de 1 mm ao longo do comprimento útil do corpo de prova de tração, figura 44, e ao término do ensaio, por meio da justaposição das duas metades dos corpos de prova rompidos, mediu-se o comprimento total para mensurar o valor do alongamento total, AT (%).

**Figura 44 – Corpo de prova micro tração após estampagem**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

**Figura 45 - Regiões onde foram retiradas as amostras para microdureza Vickers.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Deve-se destacar que, para montagem dos dados de deformação convencional expressos na curva de tensão-deformação convencional, admitiu-se que o deslocamento do cabeçote da máquina universal de ensaios correspondeu ao alongamento sofrido pelo corpo de prova.

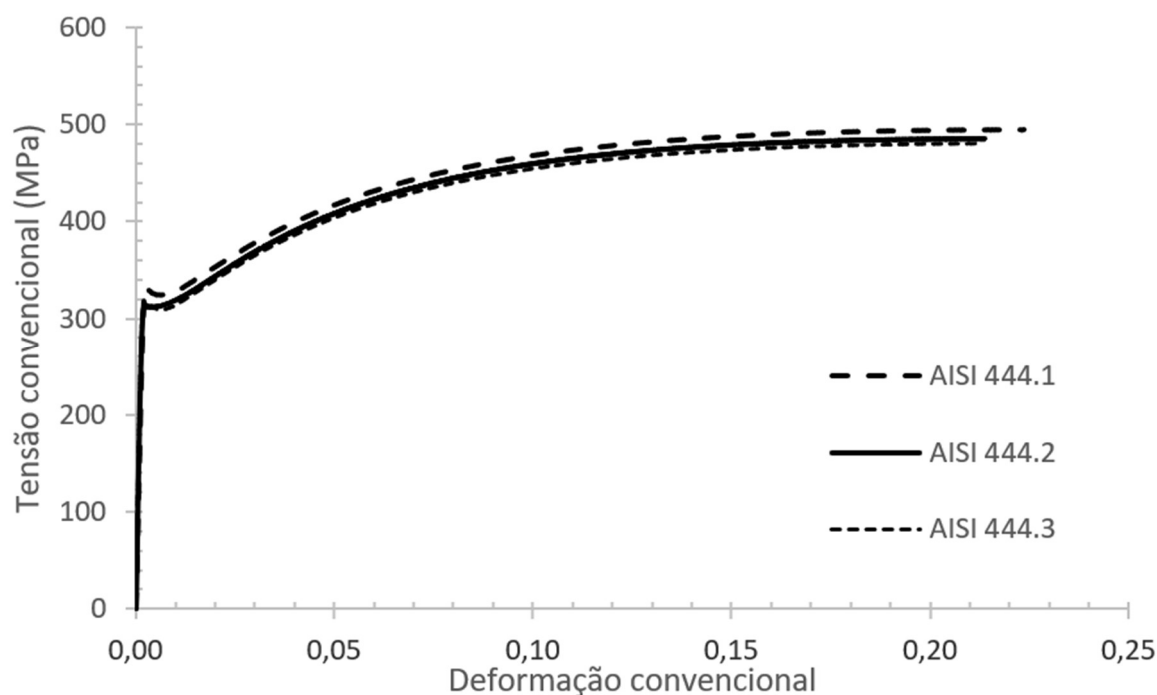
## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização mecânica antes da conformação

#### 5.1.1 Ensaio de tração

Na figura 46 é apresentada a curva tensão-deformação convencional do aço AISI 444 no estado como recebido, e como confirmado por este gráfico, no estado recozido, com a presença do patamar de escoamento, Charles et al. (2009). Nas tabelas 5 e 6 são exibidas as principais propriedades mecânicas deste material antes do início da estrição, incluindo os fatores de anisotropia .

**Figura 46 - Gráfico tensão x deformação do AISI 444 (Conforme recebido).**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

**Tabela 5 - Resumo das propriedades mecânicas do aço AISI 444 recebido.**

| Amostra        | LE (MPa)    | LRT(MPa)    | AU(%)      |
|----------------|-------------|-------------|------------|
| Média amostral | $314 \pm 7$ | $487 \pm 8$ | $21 \pm 1$ |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

**Tabela 6 – Fatores de anisotropia para o aço AISI 444 recebido.**

| Anisotropia Planar, $\Delta R$ | Anisotropia Normal Média, $R_m$ | $R0^\circ$ | $R45^\circ$ | $R90^\circ$ |
|--------------------------------|---------------------------------|------------|-------------|-------------|
| 0,068                          | 1,333                           | 1,243      | 1,299       | 1,491       |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A anisotropia normal média foi observada com um valor superior a 1, conforme mostrado na Tabela 6. Esse resultado indica que o material possui uma melhor resistência à deformação na direção da espessura, além de aumentar a resistência a rachaduras e propiciar a uniformidade das propriedades mecânicas, melhorando assim, a conformabilidade deste material. Isso é vantajoso para processos de fabricação que envolvem estampagem profunda e para aplicações onde a integridade estrutural é essencial (Abreu ,2006). Observa-se ainda que o aço AISI 444, por apresentar um valor de  $\Delta R$  positivo, pode favorecer a formação de "orelhas" no produto estampado entre  $45^\circ$  e  $135^\circ$  em relação à direção de laminação, (ALEKSANDROVIĆ et al., 2010).

Em termos de encruamento, a modelagem do comportamento mecânico do aço AISI 444 por meio da equação de Hollomon,  $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$ , ou seja, por meio dos valores da tensão de fluxo,  $\sigma$  (MPa), da constante de resistência,  $K$  (MPa), da deformação verdadeira,  $\varepsilon$ , e do expoente de encruamento,  $n$ , registrou o seguinte resultado, equação (11):

$$\sigma = 878,66 \cdot \varepsilon^{0,237} \quad (11)$$

Os aços inoxidáveis ferríticos tendem a apresentar baixos níveis de encruamento, refletindo uma capacidade limitada de endurecimento sob deformação plástica. Essa característica está associada à sua estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), que possui menos sistemas de deslizamento ativos em comparação aos aços austeníticos, dificultando a acomodação de deformações. Como resultado, esses materiais exibem uma deformação plástica mais moderada. O valor de encruamento observado, 0,237, está dentro da faixa esperada para os aços inoxidáveis ferríticos, confirmando esse comportamento (EMAMI, S.; SAEID, T., 2019).

### 5.1.2 Avaliação da dureza

Na Tabela 7 é apresentado o valor da dureza Vickers média (HV 0,2) do aço AISI 444 no estado como recebido. Foram coletados no total 10 pontos em diferentes áreas da amostra preparada. Os valores encontrados estão em concordância com os dados indicados na literatura (ASM STAINLESS STEELS HANDBOOK - 1999). Nota-se um valor de dureza menor que a máxima prevista, 220 HV, o que pode ser explicador pelo fato de o aço AISI 444 estar recozido.

**Tabela 7 - Dureza Vickers AISI 444**

| Condição      | Dureza média [HV] | Especificação*<br>[HV] |
|---------------|-------------------|------------------------|
| Como recebido | $186 \pm 16$      | 220 máx                |

\* Valor convertido para Vickers

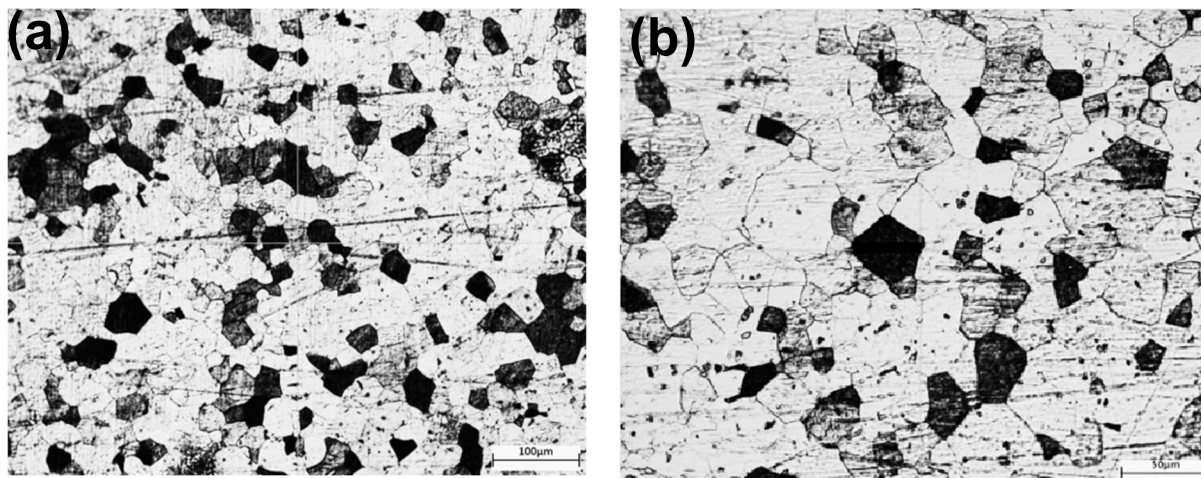
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

## 5.2 Caracterização microestrutural antes da deformação

### 5.2.1 Microestrutura

A microestrutura do aço AISI 444 na condição recozido, ou seja, no estado inicial, é apresentada na figura 47, exibindo uma microestrutura ferrítica com grãos aparentemente equiaxiais, sendo alguns grãos com coloração escura uma indicação de que ocorreu um ataque excessivo durante o ataque com o reativo químico de Vilella aplicado à amostra.

**Figura 47 - Microestrutura AISI 444, como recebido.**



a) ampliação 100x, b) ampliação 200x, ataque realizado com reativo químico Vilella.

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

### **5.2.2 Tamanho de grão**

O tamanho médio dos grãos foi de 30,72  $\mu\text{m}$ , correspondente a um tamanho de grão padrão ASTM 10, o que representa uma microestrutura com grãos relativamente finos. Esse dado é essencial para compreender como a microestrutura inicial do material pode influenciar diretamente suas propriedades mecânicas e a conformabilidade. A relação entre o tamanho dos grãos e o desempenho mecânico é fundamental para otimizar o comportamento do material em processos de conformação. De modo geral, grãos menores contribuem para uma maior resistência mecânica, principalmente devido à limitação da movimentação de discordâncias. Além disso, uma microestrutura refinada pode melhorar a conformabilidade do material, permitindo sua deformação sem fratura, especialmente em geometrias complexas, com o devido controle de aspectos estruturais que auxiliarão na sustentação da capacidade de deformação plástica. Por outro lado, grãos mais maiores tendem a aumentar a suscetibilidade a defeitos superficiais, como rugosidade e ondulações, o que pode comprometer a qualidade do acabamento, especialmente em aplicações que exigem alta qualidade superficial, algo típico em aços inoxidáveis (LIU et al., 2024; COSTA et al., 2017).

Considerando que o material escolhido neste trabalho é um aço inoxidável, deve-se mencionar que um tamanho de grão menor pode estar associado a uma maior suscetibilidade à corrosão intergranular. Isso ocorre porque, em grãos menores, a

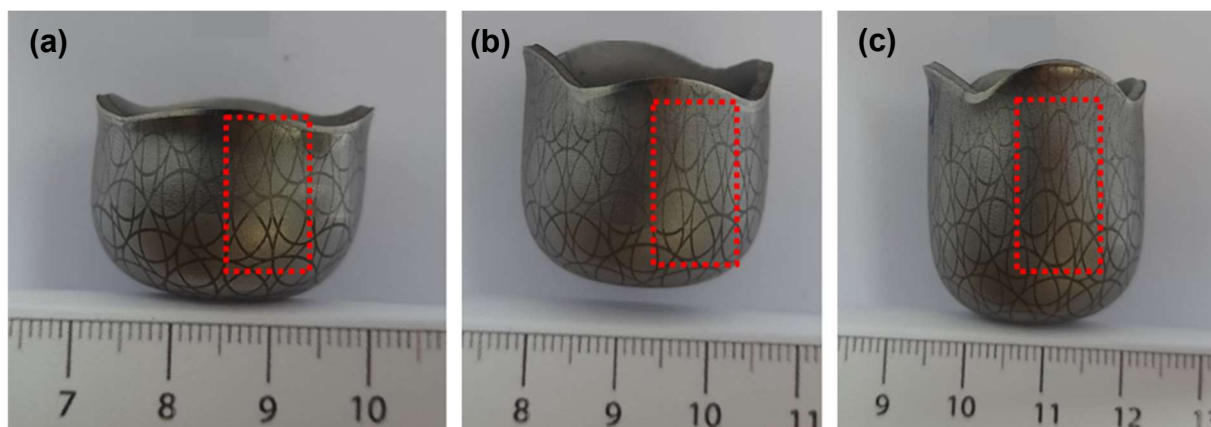
precipitação de carbonetos de cromo pode ser mais pronunciada, resultando em uma maior depleção de cromo da matriz ferrítica. Essa depleção de cromo é um fator crítico que contribui para a corrosão intergranular, pois o cromo é essencial para a formação de uma camada passiva protetora no aço inoxidável. Portanto, um tamanho de grão menor pode levar a uma diminuição na resistência à corrosão do material (SILVA, C. C. et al., 2007).

### 5.3 Caracterização mecânica do aço AISI 444 após a estampagem

#### 5.3.1 Conformação por estampagem

As figuras 48 e 49 apresentam os copos produzidos a partir de blanks com diâmetros de 50 mm, 55 mm e 60 mm, utilizando punções com raios de 7 mm e 8 mm. Com o aumento do diâmetro do blank, há um incremento na carga máxima aplicada durante o processo de estampagem do aço AISI 444, bem como na profundidade dos copos, conforme demonstrado na Tabela 8.

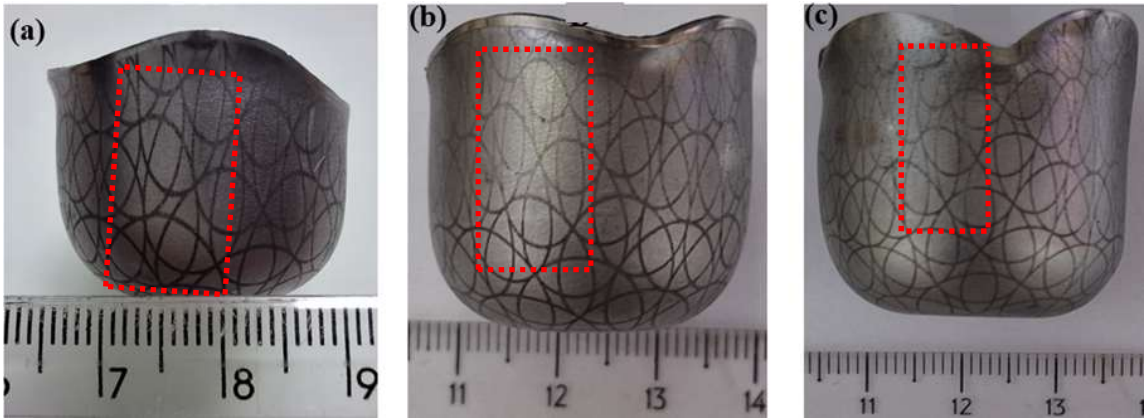
**Figura 48 - Copos estampados, com diâmetros de blank variados e raio de punção 7 mm.**



**a) Blank com Ø50mm, b) Blank com Ø55mm, c) Blank com Ø60mm**

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

**Figura 49 - Copos estampados, com diâmetros de blank variados e raio de punção 8 mm.**



a) Blank com Ø50mm, b) Blank com Ø55mm, c) Blank com Ø60mm  
**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

**Tabela 8 - Profundidade interna e carga máxima dos blanks conformados**

| Representação | Carga máxima (F) e profundidade interna (X) |                   |        |                   |
|---------------|---------------------------------------------|-------------------|--------|-------------------|
|               | D50 R7                                      | F=48,43 ± 3,30 kN | D50 R8 | F=51,46 ± 1,53 kN |
|               |                                             | X=20,1 ± 0,27 mm  |        | X=19,4 ± 0,79mm   |
|               | D55R7                                       | F=66,81 ± 0,61 kN | D55 R8 | F=66,00 ± 0,92 kN |
|               |                                             | X=25,24 ±0,37mm   |        | X=25,20 ±1,24 mm  |
|               | D60R7                                       | F=72,95 ± 2,54 kN | D60 R8 | F=72,21 ± 2,35 kN |
|               |                                             | X=32,26 ±1,24mm   |        | X=31,92 ±2,12mm   |

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

O aumento da carga máxima deve-se ao incremento decorrente da ação do encruamento devido à maior quantidade de deformação plástica sofrida pelo aço AISI 444 com o acréscimo do diâmetro dos blanks.

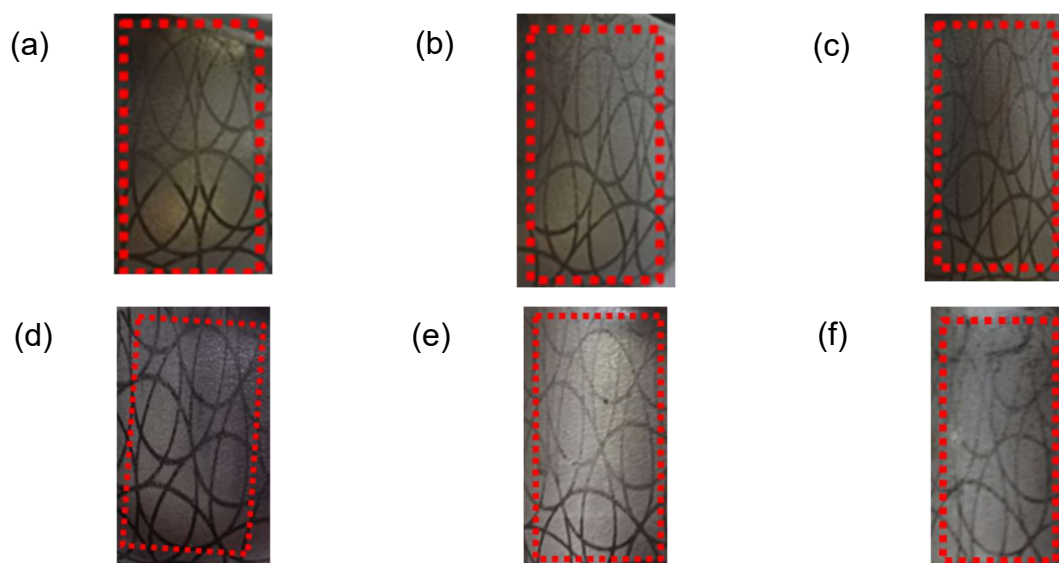
Com o objetivo de aferir uma medida do limite de estampagem do aço AISI para as condições de estampagem adotadas neste trabalho, em termos das dimensões da matriz e do punção, calculou-se o chamado LDR modificado, que foi identificado conforme indicado equação (1), vide item 3.4.1, sendo obtido o valor de 2,35.

A variação do raio na ponta do punção (raios de 7 mm e 8 mm) não influenciou o valor do LDR, mostrando que essa alteração no raio não teve impacto significativo neste resultado, ou seja, para ambos os valores de raio de punção, o diâmetro máximo do blank que foi possível obter o copo sem defeitos foi de 60 mm, considerando que o diâmetro do punção usado nos experimentos foi o mesmo, de 25,5 mm.

Na figura 50 (a) é exibida a geometria original da malha antes da deformação e as demais, figuras de 50(b) a 50(g) mostram a lateral do copo, local este em que a deformação ocorre preponderantemente no sentido axial (ao longo da altura do copo), já que o blank é arrastado (tracionado) pelo movimento do punção durante o processo de estampagem profunda. Essa região refere-se a esforços mecânicos unidimensionais com deformações ( $\epsilon_1 > 0$ ,  $\epsilon_2 \approx 0$ ). A tabela 9 apresenta a variação de espessura do copo, evidenciando uma redução nas regiões do raio inferior (regiões "C" e "E") e na lateral do copo (regiões "B" e "F"). Essa diminuição, embora sutil, é prevista e desejável no processo de estampagem profunda, indicando que o material foi conformado de forma eficiente, sem comprometer a integridade estrutural do copo.

Essa redução ocorre porque, durante o processo, as paredes laterais do copo passam por um regime de deformação predominantemente uniaxial, o que contribui para manter a espessura praticamente constante. Caso seja necessário minimizar ainda mais essa redução, podem ser implementados ajustes no processo, como melhorias na lubrificação, controle de atrito e otimização das forças (SITU et al., 2011).

**Figura 50 - Região com maior deformação da malha após a conformação**



**a)** Malha deformada D50R7, **b)** Malha deformada D55R7, **c)** Malha deformada D60R7, **d)** Malha deformada D50R8, **e)** Malha deformada D55R8, **f)** Malha deformada D60R8.

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

A Tabela 9 mostra que a maior redução de espessura ocorre nas regiões laterais e no raio dos copos (regiões B, C, E e F), como resultado do intenso estiramento necessário para o escoamento do material ao contornar a matriz. A semelhança entre os raios dos punções utilizados não resultou em diferenças significativas na redução de espessura entre as amostras, uma vez que não há movimento relativo entre o punção e a chapa durante o contato inicial dessa ferramenta com o aço durante o processo de estampagem por embutimento (COLGAN, MARK; MONAGHAN, John, 2003).

Tabela 9 - Variação da espessura ao longo do copo após conformação

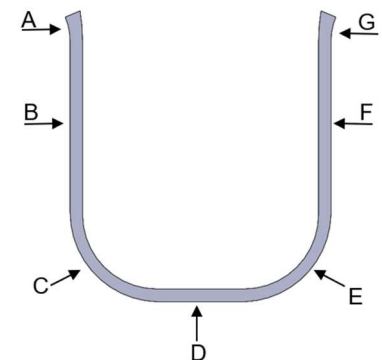


Diagrama de um copo U invertido com pontos A, B, C, D, E, F, G marcados para medição de espessura. Os pontos A, B e C estão no lado esquerdo; D está no fundo; E, F e G estão no lado direito.

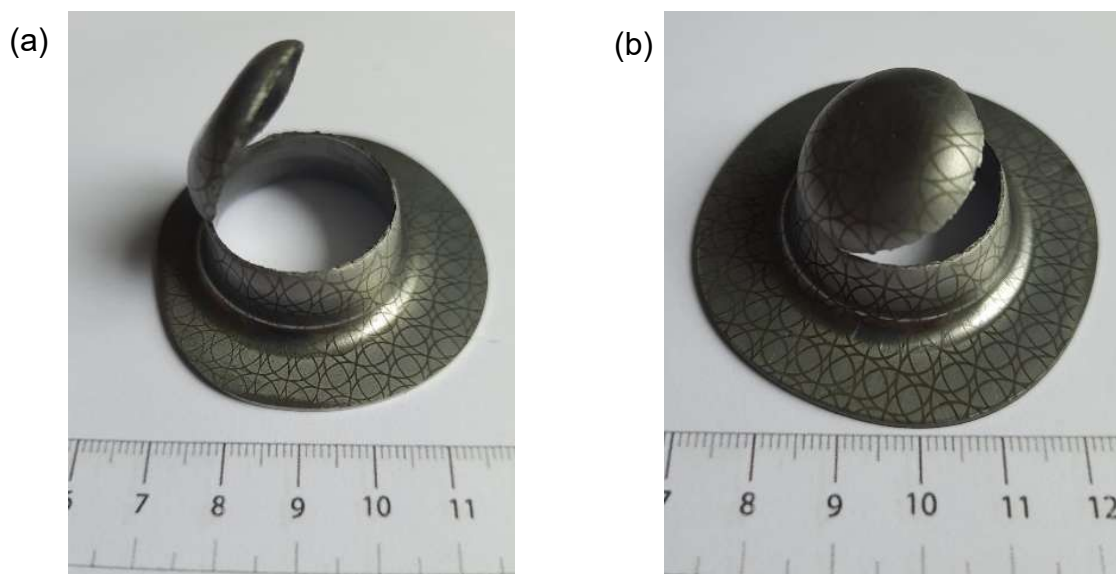
Espessura inicial do chapa: 1,51mm

| Blank | Raio punção | Região | Espessura (mm) | Blank | Raio punção | Região | Espessura (mm) |
|-------|-------------|--------|----------------|-------|-------------|--------|----------------|
| 55    | 7           | A      | 1,72           | 60    | 7           | A      | 1,65           |
|       |             | B      | 1,44           |       |             | B      | 1,42           |
|       |             | C      | 1,29           |       |             | C      | 1,32           |
|       |             | D      | 1,48           |       |             | D      | 1,43           |
|       |             | E      | 1,35           |       |             | E      | 1,29           |
|       |             | F      | 1,42           |       |             | F      | 1,30           |
|       |             | G      | 1,71           |       |             | G      | 1,67           |
| 55    | 8           | A      | 1,78           | 60    | 8           | A      | 1,71           |
|       |             | B      | 1,41           |       |             | B      | 1,40           |
|       |             | C      | 1,31           |       |             | C      | 1,30           |
|       |             | D      | 1,40           |       |             | D      | 1,40           |
|       |             | E      | 1,32           |       |             | E      | 1,29           |
|       |             | F      | 1,42           |       |             | F      | 1,39           |
|       |             | G      | 1,71           |       |             | G      | 1,69           |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Como indicado na figura 51, os blanks com 62 mm de diâmetro apresentaram fraturas na região lateral próxima ao fundo, área sujeita à maior deformação, fato corroborado pelas distorções observadas nas malhas circulares das figuras 48 e 49. Esses resultados são fundamentais para delimitar a conformabilidade do material e otimizar as condições do processo, contribuindo para a prevenção de falhas.

**Figura 51 - Blanks com diâmetro inicial de 62mm fraturado**



**a) Blank D62R7 fraturado, b) Blank D62R8 fraturado.**

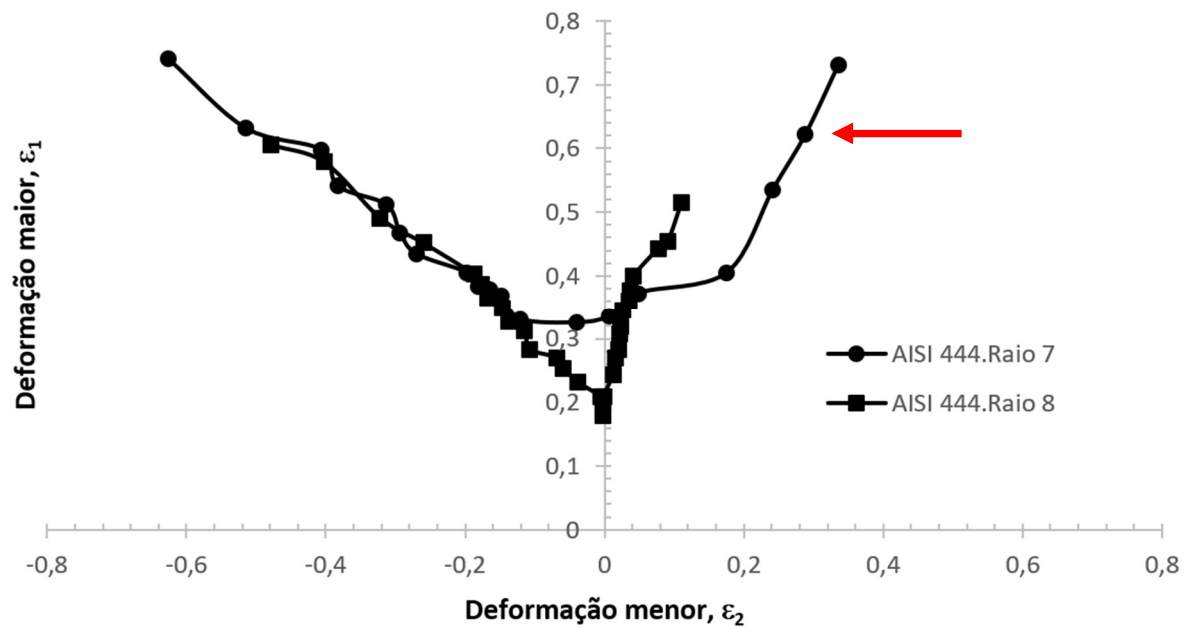
**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

### **5.3.2 Limite de deformação**

A figura 52 apresenta uma curva semelhante à Curva Limite de Conformação (CLC), tradicionalmente obtida por meio do ensaio de Nakazima, o qual utiliza um punção hemisférico e blanks com diferentes larguras para avaliar a capacidade de conformação do material. Embora neste estudo tenha sido empregada uma matriz desenvolvida especificamente para este projeto, figura 41, os procedimentos clássicos do ensaio Nakazima foram mantidos. Isso incluiu a marcação de uma malha de círculos nos blanks, seguida da medição das deformações resultantes após o processo de estampagem, permitindo a construção de uma curva representativa do limite de deformação plástica do aço AISI 444 para a matriz adotada neste estudo.

A análise da figura 52 indica que o limite de deformação experimentado pelo aço AISI 444 sob os dois valores de raio de punção foi similar, exibindo maior valor de limite de deformação na região descrita pelo carregamento de tração biaxial, ou seja, no quadrante de valores positivos de deformação maior,  $\varepsilon_1$ , e de deformação menor,  $\varepsilon_2$ , veja detalhe da seta.

**Figura 52 - Curva limite de conformação**

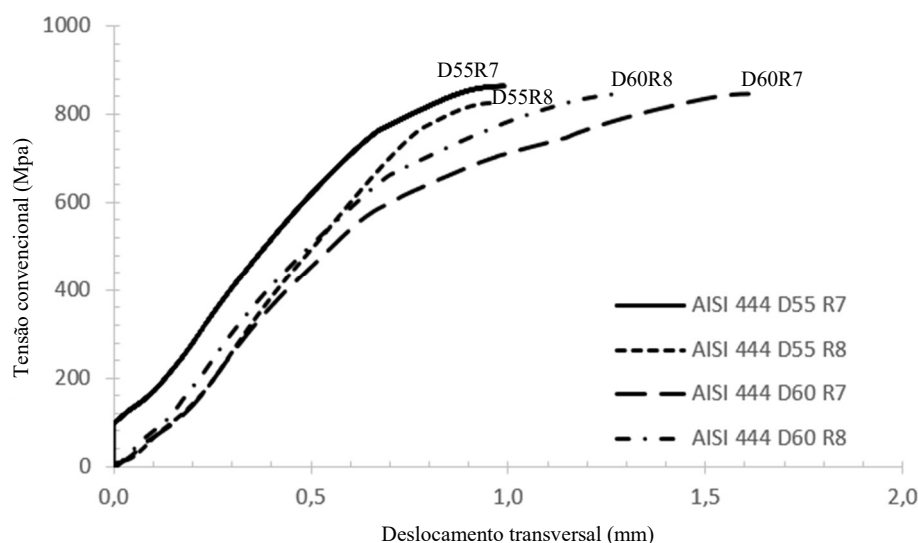


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

### 5.3.3 Ensaio de microtração

Considerando que não houve uso de extensômetro durante a realização dos ensaios de microtração, é mostrado na figura 53 o gráfico de tensão convencional-deslocamento, sendo percebido o endurecimento por encruamento do aço AISI 444 com o acréscimo do diâmetro de blank para os dois valores de raio de punção, assim como um indicativo do aumento do limite de deformação, por meio do valor do alongamento sofrido pelo corpo de prova, (apresentado no gráfico como deslocamento do cabeçote da máquina universal de ensaios). A análise da figura 53 por meio do deslocamento sugere a maior habilidade de deformação plástica para o copo confeccionado com uso do punção com raio de 7 mm.

**Figura 53 - Curvas tensão convencional-deslocamento transversal dos copos estampados para diferentes valores de blank e raio punção.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A partir dos ensaios de microtração foram identificados valores para a resistência mecânica, tensão limite de resistência à tração, LRT, e de ductilidade, a partir da marcação prévia do corpo de prova por meio do alongamento total, AT(%) como exibido na Tabela 10

**Tabela 10 - Propriedades mecânicas após ensaio de microtração (limite de resistência e percentual de alongamento).**

| Condição | LRT (MPa) | AT(%) |
|----------|-----------|-------|
| D55 R7   | 834 ± 41  | 8±1   |
| D55 R8   | 832 ± 29  | 2±1   |
| D60 R7   | 844 ± 3   | 5±1   |
| D60 R8   | 844 ± 7   | 7±1   |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

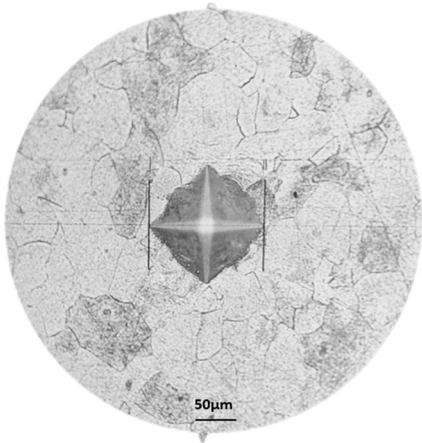
A resistência mecânica dos copos estampados apresentou uma tendência de aumento com o acréscimo do diâmetro dos blanks. O limite de resistência à tração variou entre 832 MPa, para os blanks com diâmetro de 55 mm, e 844 MPa, para os de 60 mm. Esse comportamento está associado ao fenômeno de endurecimento por encruamento. O aumento sutil do limite de escoamento observado nos blanks de 60 mm pode ser atribuído à maior redução de espessura sofrida durante a estampagem

conforme tabela 9. Esse efeito contribui para o aumento da resistência mecânica, porém pode reduzir a ductilidade do material, refletindo a interação entre resistência e capacidade de deformação plástica no aço AISI 444 (NÚÑEZ, A. et al., 2024; BEN OTHMEN, 2017).

5.3.4 Ensaio de dureza

Com o objetivo de descrever o perfil de dureza obtido pelo aço AISI 444 durante a estampagem, foi realizada a medição da dureza Vickers em diferentes posições dos copos estampados com uso dos punções de raio 7 mm e 8 mm, como mostrado na figura 54. Nas tabelas 11 e 12 são apresentados os valores de dureza Vickers em função da posição dos copos, dos diâmetros dos blanks e do raio do punção.

Figura 54 - Imagens da marcação após ensaio de microdureza Vickers no aço



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Tabela 11 - Regiões de análise para obtenção de micro dureza Vickers (D55R7 e D60R7)

| Dureza média (HV) |             |             |
|-------------------|-------------|-------------|
| Posição Copo      | Blank 55 R7 | Blank 60 R7 |
| Aba               | 287 ± 12    | 288 ± 10    |
| Lateral           | 280 ± 10    | 280 ± 12    |
| Raio              | 250 ± 11    | 262 ± 12    |
| Fundo             | 225 ± 6     | 224 ± 6     |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

**Tabela 12 - Regiões de análise para obtenção de micro dureza Vickers (D55R8 e D60R8)**

| Dureza média (HV) |             |             |
|-------------------|-------------|-------------|
| Posição Copo      | Blank 55 R8 | Blank 60 R8 |
| Aba               | $289 \pm 5$ | $286 \pm 6$ |
| Lateral           | $273 \pm 9$ | $286 \pm 5$ |
| Raio              | $243 \pm 7$ | $248 \pm 3$ |
| Fundo             | $216 \pm 4$ | $212 \pm 7$ |

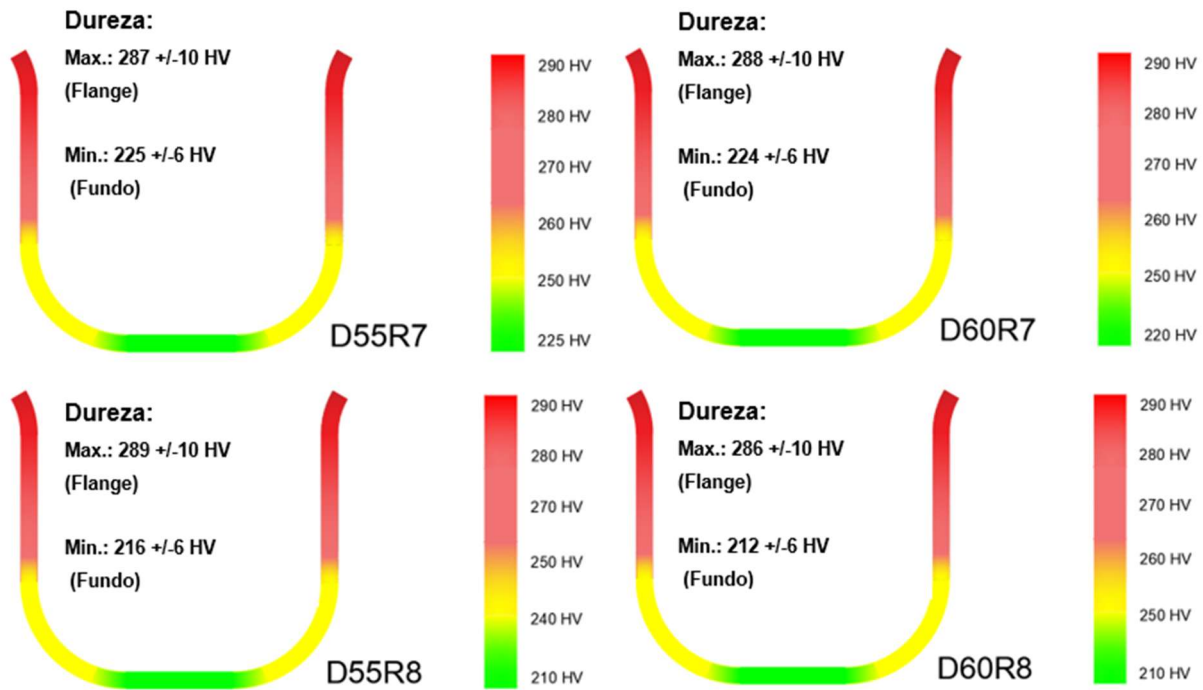
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Considerando que o valor da dureza inicial do aço AISI 444 apresentou uma média de  $186 \pm 16$  HV (antes da estampagem), nota-se que houve um aumento da dureza Vickers desse aço, especialmente nas regiões da aba e nas laterais do copo estampado, sendo isso associado à maior quantidade de deformação plástica sofrida nesses locais devido ao estado de tensões desenvolvido nessas regiões do copo, ou seja, de tensões compressivas circunferenciais e de tração radial na aba e de tração (estiramento) na lateral dos copos estampados (COLGAN, MARK; MONAGHAN, JOHN., 2003).

A microestrutura resultante (figuras 58 a 61), é caracterizada pela presença de grãos alongados de ferrita, sendo a intensidade desse alongamento um indicativo da quantidade de deformação plástica sofrida pelo material em função da posição dos copos. Como atestado dessa correlação, percebe-se a pequena ou praticamente nenhuma alteração relevante da malha de círculos no fundo dos copos e consequentemente, a menor dureza nesta posição. Além disso, a variação de espessura nessa área é mínima. Nas figuras 55 e 56 revelam essa variação da dureza ao longo das regiões do corpo de prova estampado (PEREIRA, 2021; OLGUNER et al., 2025).

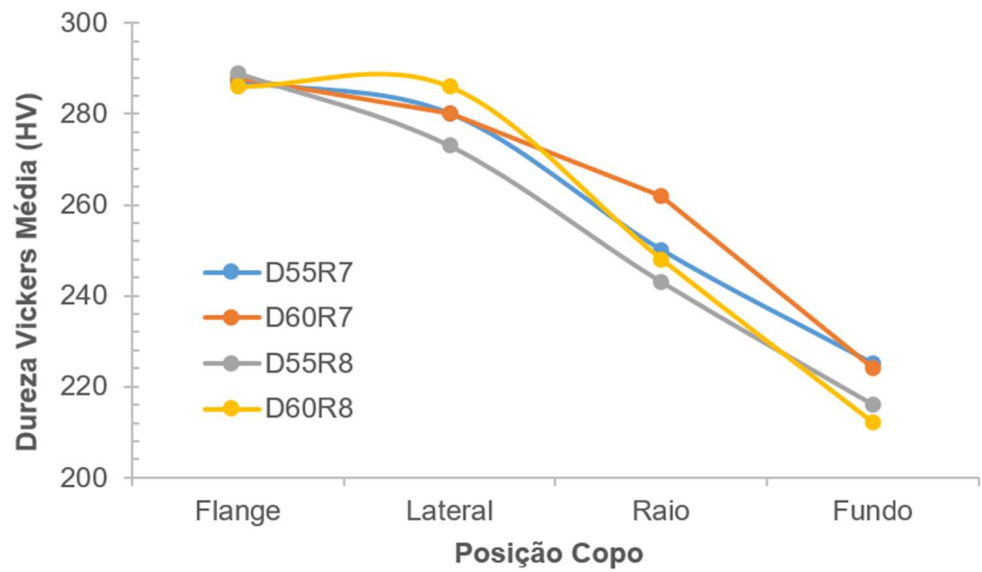
Nas figuras 55 e 56 é apresentado o perfil de distribuição da dureza Vickers em função da posição dos copos estampados do aço AISI 444 com uso dos punções de raio de 7 mm e 8 mm. Nota-se, que os valores de dureza exibiram uma variação menor dessa propriedade com a mudança do raio de punção que o exibido pelo ensaio de microtração, o qual foi concentrado apenas na região da lateral dos copos.

Figura 55 - Perfil de dureza Vickers por região dos copos estampados em função da posição do copo, do diâmetro do blank e do raio do punção.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 56 - Gráfico de dispersão da dureza Vickers em função da posição do copo, do diâmetro do blank e do raio do punção.



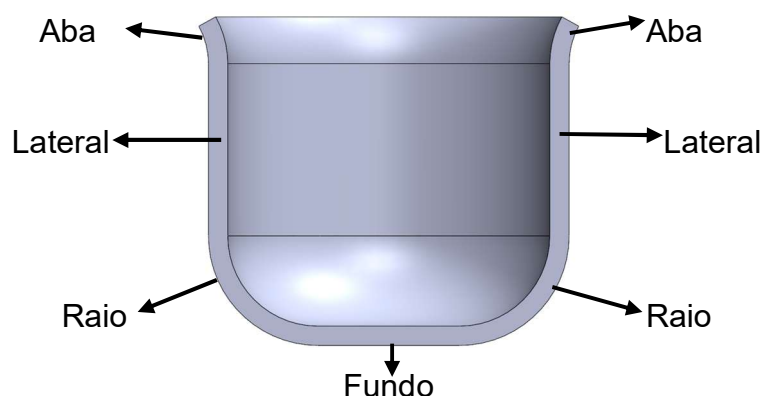
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

## 5.4 Caracterização microestrutural após a estampagem

### 5.4.1 Análise microestrutural

Como exposto na figura 38 do item Materiais e Métodos, e aqui representado na figura 57, a análise microestrutural foi executada em quatro regiões dos copos estampados com blank de 60 mm de diâmetro com uso dos punções de raios 7 mm e 8 mm.

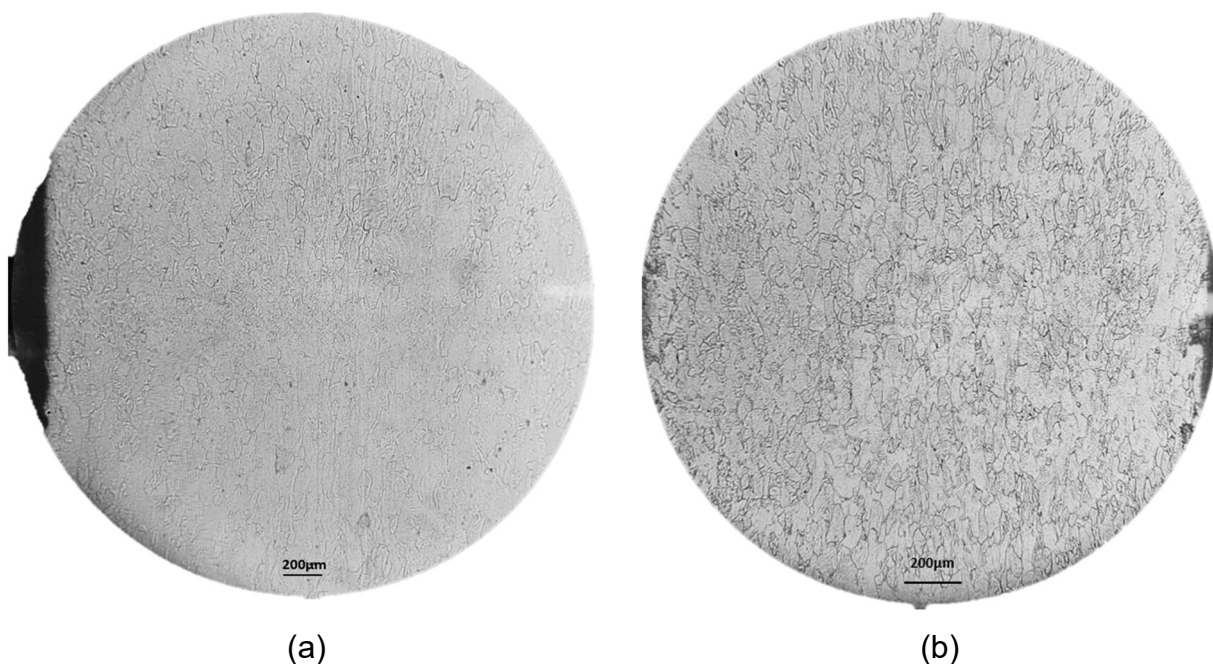
**Figura 57 - posições do copo onde foi analisada a microestrutura.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A microestrutura após a estampagem exibiu basicamente o alongamento dos grãos, sendo tal característica mais facilmente percebida nas regiões de maior deformação plástica, como nas abas e nas laterais dos copos ao se observar visualmente a variação dimensional sofrida pela malha de círculos, por isso que essas regiões foram selecionadas, sendo tal investigação realizada apenas nos copos que exibiram maior profundidade, no caso, os copos obtidos a partir dos blanks com diâmetro de 60 mm. Na figura 58 são apresentadas as microestruturas para a região da aba, percebendo-se a tendência de maior alongamento dos grãos para o raio de punção de 8 mm, sendo tal resultado compatível com o perfil de dureza identificado no item 5.3.4, que também exibiu dureza elevada nessa região do copo estampado (LUIZ et al., 2023; LIU et al., 2024).

**Figura 58 - Microestrutura AISI 444 da região da aba com raio de punção 7mm e 8 mm, Ampliação de 100x Blank de 60mm:**

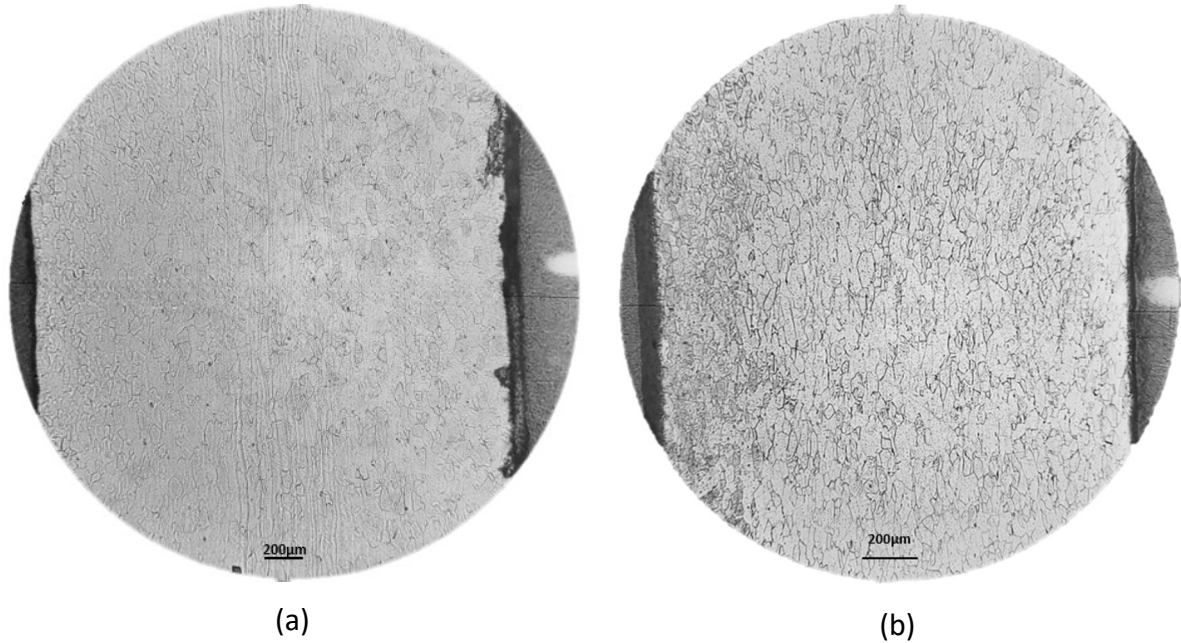


**a)** Raio punção 7 mm, **b)** raio punção 8 mm.

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

De modo análogo ao observado na aba, é observado na região da lateral dos copos, figura 59, o alongamento dos grãos e novamente, a maior tendência dessa variação dos grãos no copo estampado com punção de raio de 8 mm, (ABREU et al., 2006).

**Figura 59 - Microestrutura AISI 444 da região lateral com raio de punção 7mm e 8 mm, Ampliação de 100x Blank de 60mm:**

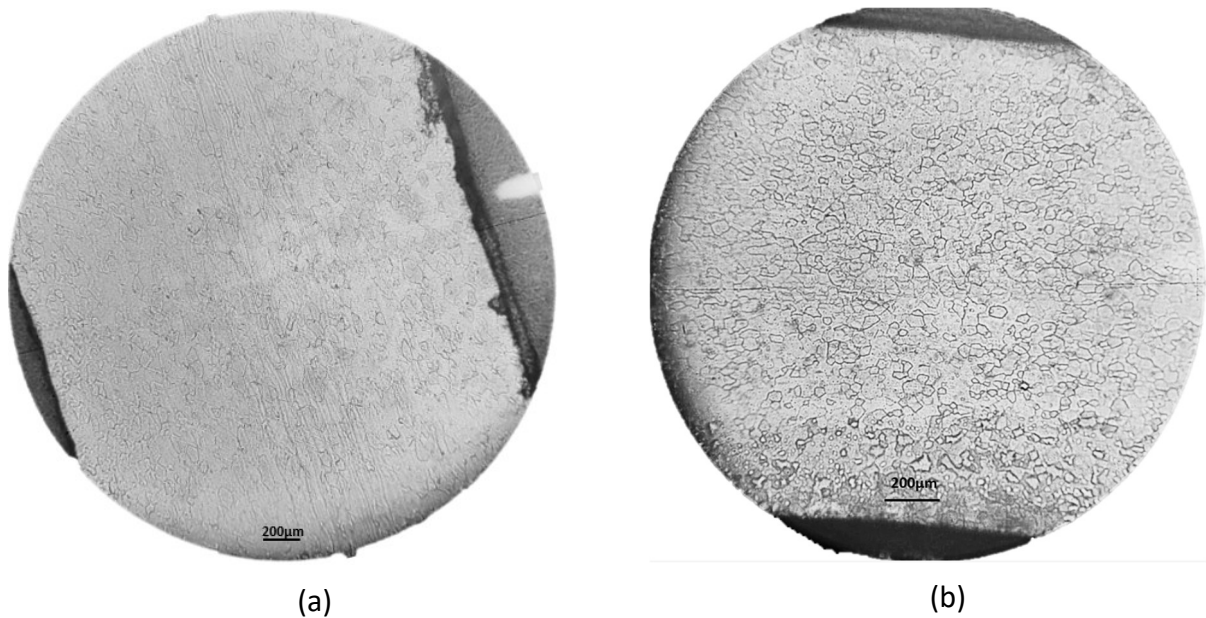


**a)** Raio punção 7 mm, **b)** raio punção 8 mm.

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

Na figura 60 é mostrada a microestrutura da região do raio dos copos, composta por grãos alongados e paralelos, sugerindo a formação de uma textura, e assim, mudança na resposta mecânica do aço inoxidável ferrítico AISI 444 (LIU et al., 2024).

**Figura 60 - Microestrutura AISI 444 da região do raio com raio de punção 7mm e 8 mm, Ampliação de 100x Blank de 60mm:**

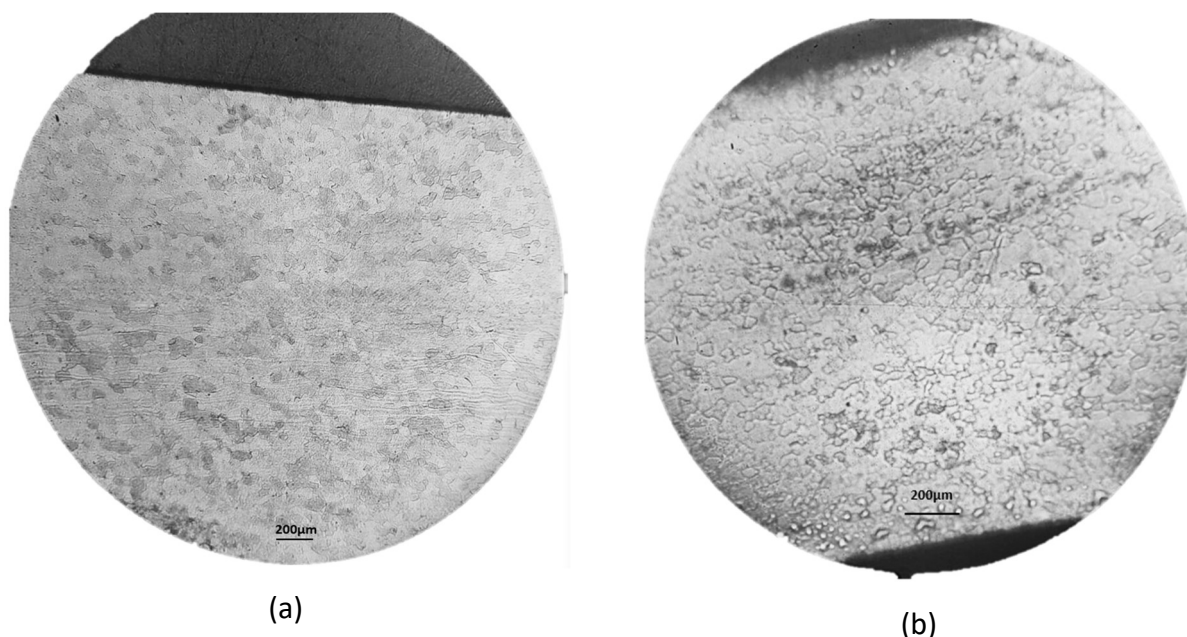


**a)** Raio punção 7 mm, **b)** raio punção 8 mm.

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

Como detectado pela observação visual e pelos resultados do ensaio de dureza Vickers, a região do fundo dos copos não sofreu deformação plástica significativa como exposto na figura 61, exibindo uma microestrutura homogênea, composta predominantemente por grãos sem orientação específica (LIU et al., 2024).

**Figura 61 - Microestrutura AISI 444 da região do fundo com raio de punção 7mm e 8 mm, Ampliação de 100x Blank de 60mm:**



**a)** Raio punção 7 mm, **b)** raio punção 8 mm.

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

A maior deformação observada na aba e na lateral, especialmente nos copos estampados com raio de punção de 8 mm, está associada ao arraste do blank pelo punção durante o processo de conformação. Essa deformação promove alterações microestruturais que aumentam a dureza e podem melhorar a resistência mecânica nas regiões afetadas. Por outro lado, a menor deformação no fundo garante a integridade estrutural da região, importante para evitar falhas durante a aplicação prática (LUIZ, 2023; LIU et al., 2024).

#### **5.4.2 Análise por Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD).**

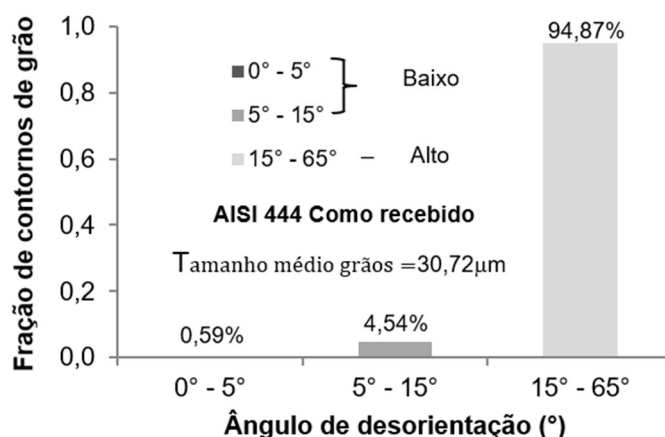
O ensaio de difração de elétrons retroespalhados (EBSD) evidenciou que a estampagem modificou a orientação cristalográfica do aço AISI 444, mesmo que tal mudança não tenha sido tão intensa. Adicionalmente, revelou ainda efeito, mesmo que também reduzido, do raio do punção no desenvolvimento dessa orientação cristalográfica, sugerindo que a variação de apenas 1 mm entre os valores adotados para o raio do punção não foi suficiente para ocasionar modificação relevante na orientação cristalográfica assumida pelo aço AISI 444 durante a operação de estampagem.

#### **5.4.2.1 Desorientação dos grãos.**

A distribuição da desorientação dos grãos exibida pelo aço AISI 444 desde o estado como recebido, figura 62, assim como das amostras retiradas da lateral dos copos estampados a partir do blank de 60 mm com uso de punção com raio de 7 mm, figura 63, e do copo confeccionado com o blank de 60 mm e punção com raio de 8 mm, figura 64 revelaram a predominância de desorientações de grãos na faixa de  $15^\circ$  a  $65^\circ$ , ou seja, de alto ângulo. Isso sugere a presença de uma barreira eficaz contra a movimentação das discordâncias, contribuindo para o aumento da resistência mecânica do material. Tal efeito se deve ao fato de que as discordâncias têm mais dificuldade em atravessar os limites dos grãos, especialmente quando a desorientação é acentuada. O efeito de endurecimento resultante dessa estrutura é explorado em aços e ligas que precisam combinar resistência com tenacidade. É importante observar que o endurecimento mencionado pode levar à formação de novos limites de alta angulação, frequentemente associados à fragmentação dos grãos. Esse fenômeno pode impactar as propriedades mecânicas do material, reduzindo a ductilidade e limitando a conformabilidade, especialmente em processos de conformação a frio (YVELL, K. et al., 2018 e MORAIS, F. L. D. et al., 2022).

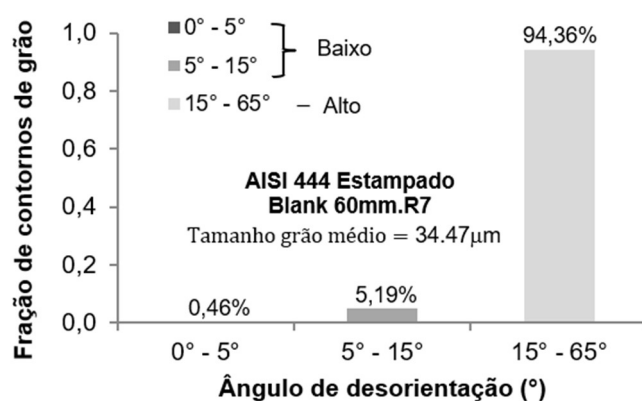
Como se trata de uma amostra no estado como recebido, ou seja, de um material advindo de um processamento que combinou laminação a frio e recozimento (vide presença do patamar de escoamento no gráfico exibido na figura (46)), isso sugere que tal condição seja adequada a uma condição específica de uso do aço AISI 444 que requeira uma resistência mecânica adequada ao uso, como, por exemplo, na confecção de componentes de um sistema de exaustão de veículos, aplicação essa que requer resistência à corrosão em temperatura elevada, além de vibrações mecânicas, (DONG, et al., 2023).

**Figura 62 - Desorientação dos grãos - AISI 444 Conforme recebido.**



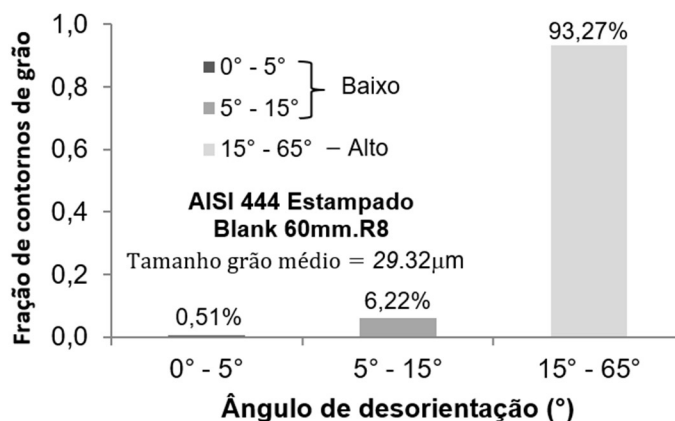
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

**Figura 63 - Desorientação dos grãos - AISI 444, lateral do copo estampado com blank de 60mm e punção com raio de 7mm.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

**Figura 64 - Desorientação dos grãos - AISI 444, lateral do copo estampado com blank de 60mm e punção com raio de 8mm.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Não houve mudança na faixa de desorientação dos grãos desde o estado como recebido até a condição após a estampagem, assim como o tamanho médio dos grãos, apenas o copo estampado com blank de 60 mm e punção de raio 7 mm que exibiu um aumento de valor, variando desde 30,72  $\mu\text{m}$  (como recebido) para 34,47  $\mu\text{m}$ , confirmando o maior limite de deformação nessa condição, como havia sido registrado na curva limite de conformação mostrada na figura 53 (MATSUOKA, et al., 2013; SUZUKI et al., 2021). Isso sugere ainda que a quantidade de deformação plástica que o aço AISI 444 experimentou durante a estampagem conduzida neste trabalho não foi intensa o suficiente para modificar a desorientação dos grãos.

#### **5.4.2.2 Textura**

A descrição da evolução da textura do aço AISI 444 desde o estado como recebido até a estampagem revelou pequena modificação da textura, sendo tal alteração mais notável na amostra retirada da lateral do copo estampado com blank de 60 mm e punção com raio de 7 mm, confirmando os resultados anteriores de caracterização mecânica de tração e dureza Vickers. Tal análise é fundamental para compreender as propriedades mecânicas de um produto estampado (ZHAO et al., 2022).

A investigação da textura assumida pelo aço AISI 444 é mostrada desde o estado como recebido, figura 65, assim como para o produto estampado a partir do blank com diâmetro de 60 mm, com raio de punção de 7 mm, figura 66, e raio de 8 mm, figura 67, por meio das figuras de polos nos planos (100), (110) e (111).

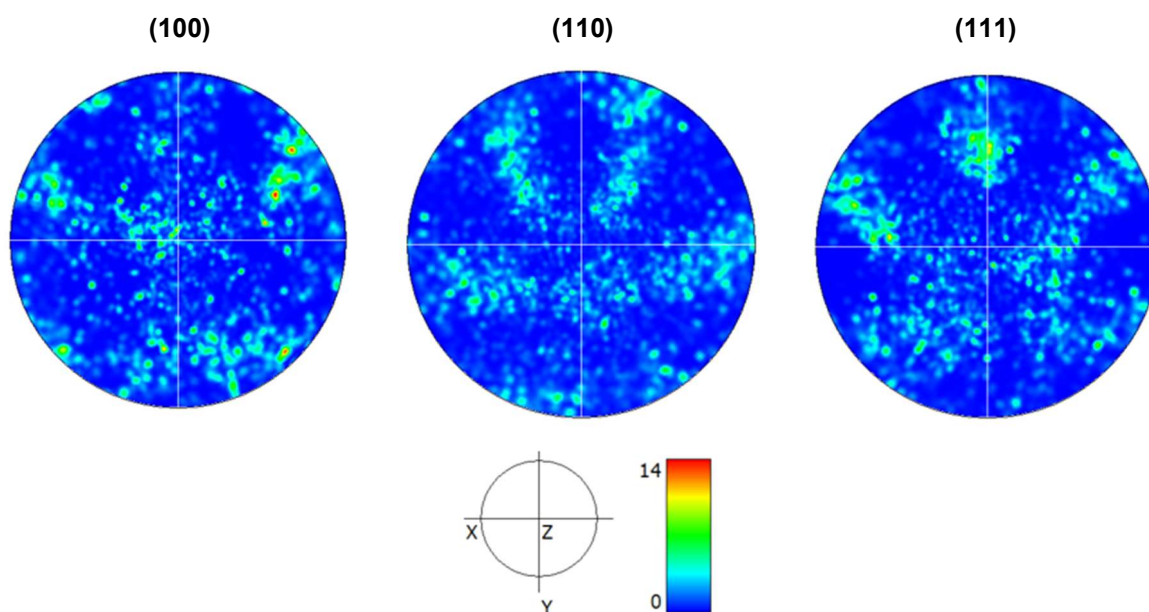
No estado como recebido, figura 65, nota-se uma textura relativamente isotrópica, com tendência para o desenvolvimento de orientação preferencial nos planos (100) e (111), embora sem uma textura predominante. Essa característica pode ser associada ao estado laminado a frio, que geralmente promove uma textura mais difusa, com o estabelecimento de orientações específicas em função, por exemplo, das necessidades de uso do material (MARUMA et al., 2013).

Ao analisar a amostra com blank de 60 mm estampada com punção de raio 7 mm, 60R7, figura 66, observa-se no plano (100) uma orientação mais definida que no

estado como recebido. No plano (110) há áreas com intensificação moderada ao longo das bordas e de forma mais difusa no centro. Já o plano (111) apresentou uma orientação mais alinhada e intensa para esse plano após a estampagem, o que não estava tão evidente no material como recebido.

A amostra estampada a partir do blank de 60 mm e raio punção de 8 mm, 60R8, figura 67, exibiu no plano cristalográfico (100) orientação similar ao observado na condição como recebido, enquanto no plano (111) é possível observar que apresenta uma concentração de orientação moderada, característica de uma textura de deformação induzida pela estampagem (NÚÑEZ, A. et al., 2024).

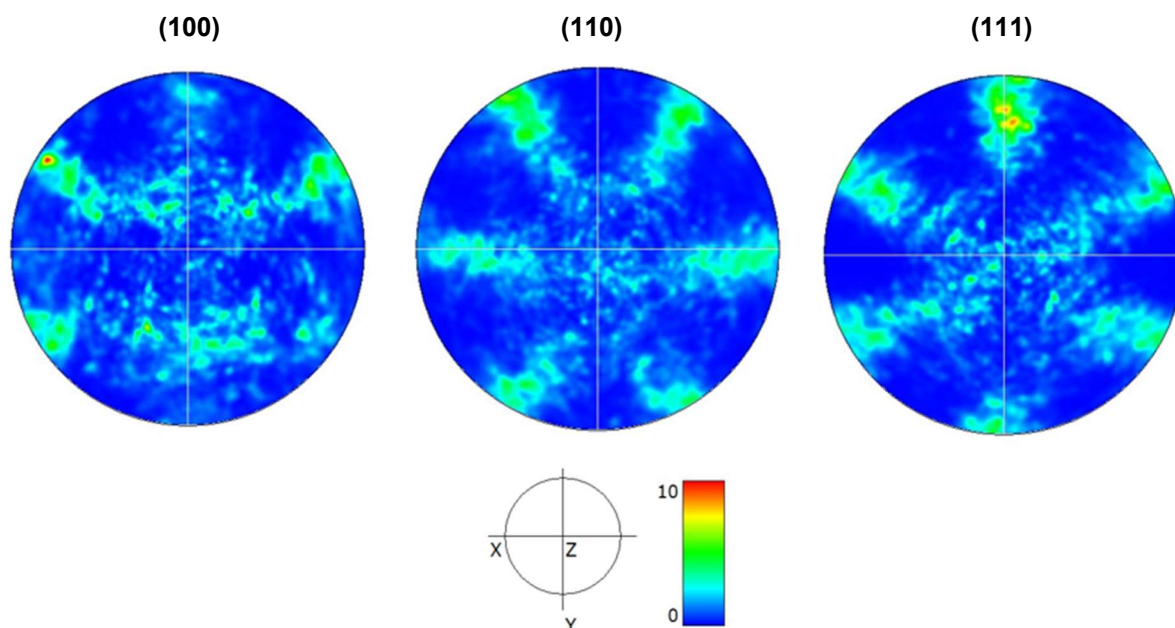
**Figura 65 - Figura de polo - Fase ferrita – AISI 444 Como recebido.**



100155 pontos; Projeção estereográfica; Largura de convolução: 5°

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024**

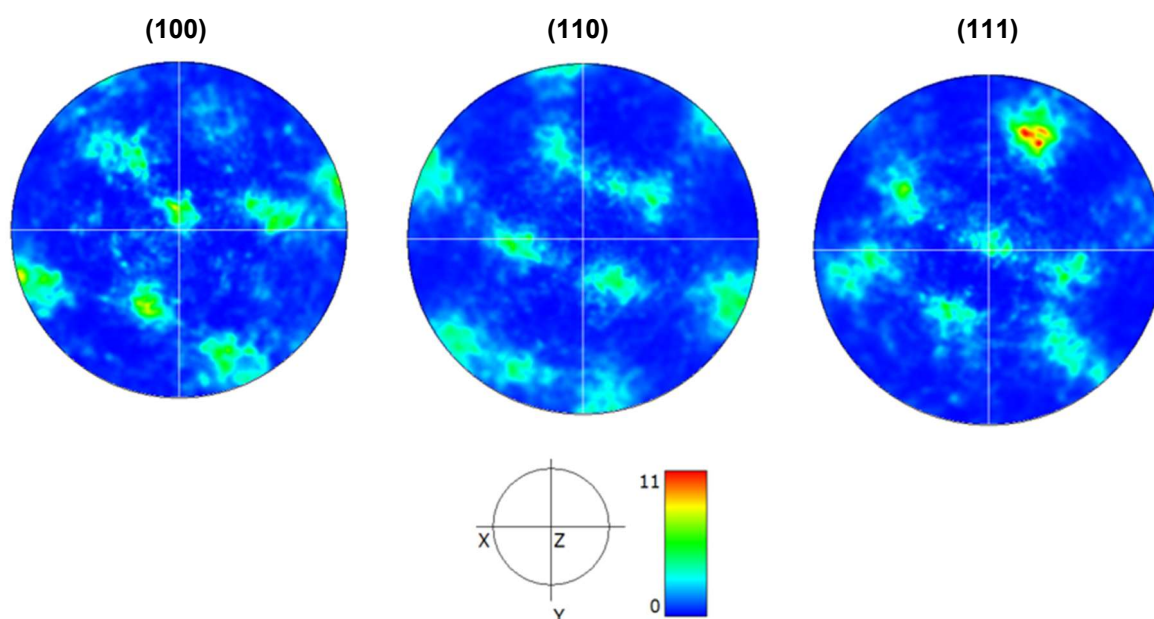
**Figura 66 - Figura de polo - Fase ferrita - AISI 444 após estampagem (D60-R7).**



71559 pontos; Projeção estereográfica; Largura de convolução: 5°

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024**

**Figura 67 - Figura de polo - Fase ferrita - AISI 444 após estampagem (D60-R8).**



78940 pontos; Projeção estereográfica; Largura de convolução: 5°

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024**

Os resultados indicam que a estampagem gerou uma textura de deformação, com aumento da intensidade em regiões específicas, principalmente no plano (111). Essa mudança sugere que o processo de conformação mecânica afetou a orientação cristalográfica da fase ferrítica, promovendo a reorganização dos grãos em resposta

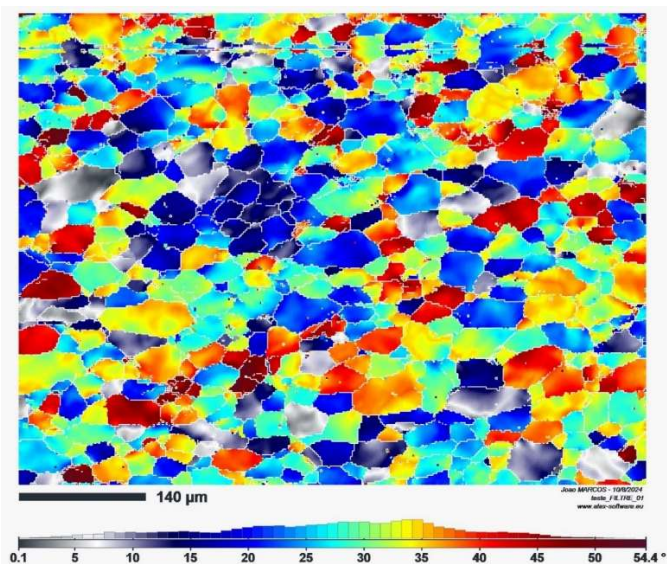
às tensões aplicadas, característica típica de processos de deformação plástica e determinante para a evolução da textura final. Em contraste com o material no estado como recebido, que apresentava uma textura mais difusa, o material estampado mostra uma estrutura cristalográfica mais definida, o que pode influenciar diretamente suas propriedades mecânicas (Abreu et al., 2015; Li et al., 2022).

Após a estampagem, há uma orientação mais direcionada, especialmente no plano (111), indicando que o processo de conformação afetou a estrutura cristalográfica, promovendo a organização dos grãos de acordo com as tensões aplicadas. Além disso, foram observadas uma orientação mais intensa dos grãos nos planos (100) e (110), demonstrando que a deformação imposta resultou em uma textura mais definida (Chemin Filho e Marcondes, 2009).

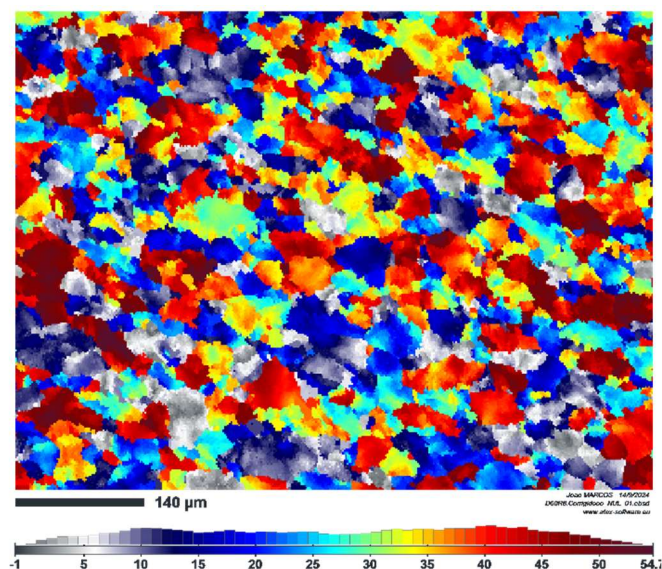
Na figura 68 é exibido o mapa de orientação cristalográfica baseado no ângulo entre as direções  $X = 0$ ,  $Y = 0$ ,  $Z = 1$  direção [111] para o blank de 60 mm estampado com punção de raios de 7mm e 8mm, além do material no estado como recebido. Os gráficos utilizam uma escala de cores para representar o ângulo de desorientação ou ângulo entre as direções cristalográficas em cada ponto da amostra. As barras de cores na parte inferior, que vai de azul (ângulos menores) a vermelho (ângulos maiores), correspondem aos ângulos de desorientação entre os grãos ou fases.

**Figura 68 - Mapa de desorientação dos grãos - Ângulo entre  $X=0$   $Y=0$   $Z=1$  e direções  $[111]$ .**

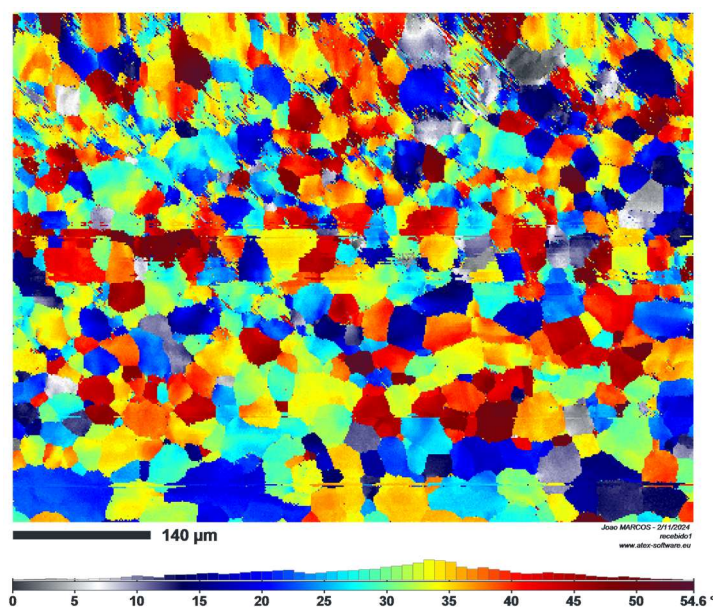
**A-D60R7**



**B-D60R8**



**C-Conforme recebido**



- a)** Tamanho do passo: 2,077 μm Resolução: 333x250 Taxa: 100% Ampliação 300x Tensão: 30kv Ângulo mínimo: 0,15 Ângulo máximo: 54,4 Ângulo médio: 27,32 Desvio padrão: 10,51 Entropia: 3,392 Média: 28,47 Moda: 35,66,  
**b)** Tamanho do passo: 1,731 μm Resolução: 400x300 Taxa: 100% Ampliação 300x Tensão: 30kv Ângulo mínimo: -1 Ângulo máximo: 54,7 Ângulo médio: 27,63 Desvio padrão: 14,07 Entropia: 3,601 Média: 28,52 Moda: 40,7,  
**c)** Tamanho do passo: 1,385 μm Resolução: 500x375 Taxa: 100% Ampliação 300x Tensão: 30kv Ângulo mínimo: 0,05 Ângulo máximo: 54,6 Ângulo médio: 30,07 Desvio padrão: 10,79 Entropia: 3,475 Média: 31,74 Moda: 2,3.

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.**

As diferentes cores no mapa sugerem uma microestrutura composta de vários grãos com diferentes orientações cristalográficas, o que é esperado em muitos materiais policristalinos. As áreas coloridas de forma contínua indicam regiões onde os cristais possuem orientações relativamente semelhantes. Regiões com transições abruptas de cor correspondem a limites de grão, onde há uma grande diferença na orientação cristalográfica entre grãos adjacentes (HAMADA et al., 2003).

As regiões em vermelho indicam altos ângulos de desorientação ( $>40^\circ$ ), sugerindo que há grãos altamente desorientados ou com altos limites de grão, o que pode impactar propriedades mecânicas como resistência à deformação e fraturas. As áreas em azul (ângulos menores) sugerem orientações semelhantes entre alguns grãos. A tabela 13 mostra que após a conformação não houve grandes varrições no ângulo médio das amostras.

**Tabela 13 - Ângulos analisados entre X=0 Y=0 Z=1 e direções [111] (Todas as fases) - (D60R7 - D60R8 - Conforme recebido)**

| Distribuição de ângulos                                             |                                                                     |                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| D60R7                                                               | D60R8                                                               | Conforme recebido                                                   |
| Ângulo máximo: $54,4^\circ$<br>Média: $27,32^\circ \pm 10,51^\circ$ | Ângulo máximo: $54,7^\circ$<br>Média: $27,63^\circ \pm 14,07^\circ$ | Ângulo máximo: $54,6^\circ$<br>Média: $30,07^\circ \pm 10,79^\circ$ |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Ao avaliar a amostra do AISI 444 no estado como recebido percebe-se que a variedade de cores indica uma distribuição relativamente aleatória das orientações cristalográficas dos grãos. Isso sugere que o material não possui uma textura forte, ou seja, os grãos não estão preferencialmente orientados em um determinado plano e direção. Observando o mapa, pode-se concluir que o aço possui uma distribuição de tamanho de grão relativamente homogênea, sem a presença de grãos excessivamente grandes ou pequenos. A ausência de uma textura forte e a distribuição relativamente homogênea do tamanho de grão indicam que o material está em um estado próximo ao de equilíbrio termodinâmico, o que é típico de um material policristalino com distribuição aleatória de orientações cristalográficas e tamanho de grão relativamente homogêneo (DESPRÉS, A. et al., 2021).

Ao realizar uma análise comparativa entre o mapa IPF do aço AISI 444 no estado como recebido e após a estampagem permite avaliar as alterações microestruturais induzidas pelo processo de conformação mecânica. A estampagem, ao submeter o material a deformações plásticas intensas, promove modificações na orientação cristalina e no tamanho dos grãos e na distribuição das fases. A presença de cores predominantes em determinadas regiões do mapa indica o desenvolvimento de uma textura cristalina mais pronunciada em comparação ao estado como recebido onde a distribuição de orientações é mais aleatória, indicando uma textura fraca. Após a estampagem, a textura se torna mais pronunciada, com a formação de uma fibra de orientação preferencial. Essa mudança na textura pode influenciar as propriedades mecânicas anisotrópicas, ou seja, as propriedades do material como a resistência e a ductilidade variam dependendo da direção de aplicação da carga. O refinamento do tamanho de grão observado após a estampagem é um fenômeno típico de processos de deformação plástica. Grãos mais finos geralmente conferem ao material maior resistência mecânica e dureza (HAMADA et al., 2003).

Quando se compara os resultados entre o punção de raio 7mm com o de raio 8mm percebe-se que no punção de raio 7mm a deformação plástica tende a se concentrar em uma área menor, resultando em maiores gradientes de deformação e maior intensidade de deformação nessa região. Já no de raio 8mm a deformação ocorre em uma área maior, reduzindo a intensidade da deformação local e aumentando a uniformidade da deformação (HAMADA et al., 2003 e CHEMIN FILHO et al., 2009).

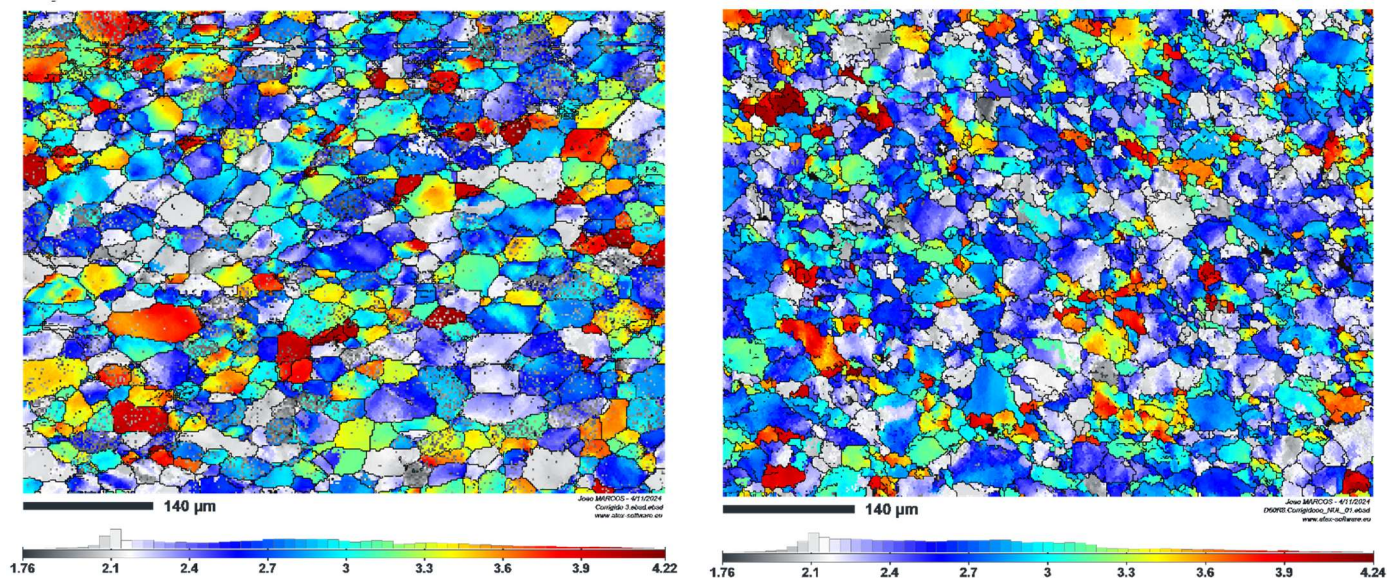
Na figura 69 é mostrada a análise do fator de Taylor que, em resumo, pode ser definido como uma medida que quantifica a relação entre a orientação cristalina de um material e sua resposta à deformação, considerando a influência de mecanismos como o deslizamento e seu impacto na resistência e ductilidade de um material (DESPRÉS, A. et al., 2021). Um fator de Taylor alto (grãos vermelhos e laranjas) indica regiões onde os grãos foram mais deformados e onde houve maior movimento das discordâncias. Em alguns casos, isso pode estar associado a uma maior suscetibilidade à deformação, o que se traduz em maior ductilidade local. Um fator de Taylor baixo (grãos cinzas e azuis) indica áreas onde a deformação plástica é menor, associando-se a regiões mais rígidas ou com menor capacidade de acomodação da deformação (YVELL, K et al., 2018).

O mapa de fator de Taylor antes da conformação (conforme recebido) do aço AISI 444 revela uma microestrutura com áreas bem definidas de alta e baixa resistência à deformação. O processo de conformação com os diferentes raios de punção redistribui essas regiões, reduzindo a concentração de áreas de alta resistência (em vermelho e laranja) e promovendo uma microestrutura mais homogênea. Essa homogeneização é desejável em aplicações práticas, pois melhora a conformabilidade e reduz a possibilidade de falhas por concentração de tensões, tornando o material mais confiável para aplicações que exigem alta resistência mecânica e estabilidade dimensional. Após a conformação, a análise dos fatores de Taylor indicam que o D60R8, com média de 2,68, apresenta uma resposta ligeiramente superior à deformação plástica em relação ao blank estampado com punção de raio 7 mm, que possui média de 2,5. Essa diferença está associada ao maior raio do punção de 8 mm, que promove uma deformação mais suave e menos concentrada, resultando em uma distribuição de tensões mais homogênea. Em contraste, o punção de 7 mm gera uma maior variação nos fatores de Taylor, criando áreas de resistência à deformação mais intensa e consequentemente, aumentando o risco de defeitos, como trincas. Portanto, o punção de 8 mm demonstra maior eficácia ao distribuir áreas de alta resistência, reduzindo os pontos de concentração de tensões e a probabilidade de falhas localizadas (YVELL, K et al., 2018).

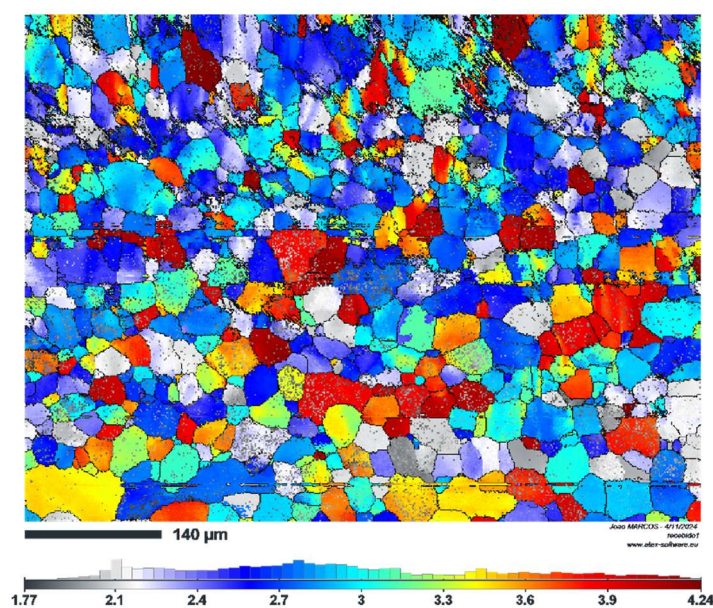
**Figura 69 - Fator de Taylor (D60R7 - D60R8 - Conforme recebido).**

**A-D60R7**

**B-D60R8**



**C-Conforme recebido**



**a)** Tamanho do passo: 2,077 $\mu$ m; resolução 333x250; ampliação: 300x; tensão:30KV; média: 2,5; desvio padrão: 1,01; entropia: 3,387, **b)**Tamanho do passo: 1,731 $\mu$ m; resolução 400x300; ampliação: 300x; tensão:30KV; média: 2,68; desvio padrão: 0,55; entropia: 3,35, **c)** Tamanho do passo: 1,385 $\mu$ m; resolução 500x375; ampliação: 300x; tensão:30KV; média: 2,56; desvio padrão: 1,09; entropia: 3,542.

**Fonte: Elaborado pelo autor. 2024**

## 6 Conclusões

O estudo sobre o aço inoxidável AISI 444 evidenciou a interação entre sua estrutura e as propriedades mecânicas durante a estampagem profunda, aspectos cruciais para sua aplicação em processos industriais. A microestrutura inicial do material, composta por grãos ferríticos equiaxiais, contribuiu para um desempenho mecânico consistente, especialmente quando submetido a deformações plásticas.

A estampagem resultou em endurecimento do material, evidenciado pelo aumento na dureza nas regiões conformadas. Esse encruamento reflete o desenvolvimento de tensões internas e a redistribuição de esforços durante o processo. A análise do fator de Taylor indicou uma evolução para uma estrutura mais homogênea após a conformação, reduzindo concentrações de tensões e, conseqüentemente, o risco de falhas.

A caracterização da textura do aço AISI 444 antes e após a estampagem mostrou uma transição de uma condição isotrópica para uma textura preferencial, especialmente no plano (111), indicando a ocorrência de deformação plástica direcionada. Essa reorganização cristalográfica pode ser explorada para ajustar o desempenho mecânico do material conforme a exigência da aplicação final.

Além disso, a predominância de desorientações angulares entre  $15^\circ$  e  $65^\circ$  reforça a capacidade do material de resistir ao movimento de discordâncias, aumentando sua resistência. No entanto, é necessário controlar o endurecimento localizado, que pode comprometer a ductilidade e limitar a conformabilidade em etapas subseqüentes.

De modo geral, os resultados obtidos confirmam o potencial do aço AISI 444 para aplicações que envolvam processos de conformação mecânica severa, demonstrando bom desempenho estrutural e estabilidade dimensional ao longo da estampagem profunda.

## RERFERÊNCIAS

**ABNT – NBR 6892:2018.** Materiais metálicos: ensaio de tração à temperatura ambiente. 80 p. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

**ABREU, H. F. G. de; BRUNO, A. D. S.; TAVARES, S. S. M.; SANTOS, R. P.; CARVALHO, S. S.** Effect of high temperature annealing on texture and microstructure on an AISI-444 ferritic stainless steel. *Materials Characterization*, v. 57, p. 342-347, 2006.

**ASM INTERNATIONAL.** ASM Specialty Handbook – Stainless Steels. 1. ed. Ohio: J.R. Davis, 1999. p. 3-12.

**BADDOO, N. R.** Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 64, n. 11, p. 1199–1206, nov. 2008.

**BASTOS, Alexandre Lundgren.** Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação. 2009. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

**BEN OTHMEN, K.; SAI, K.; MANACH, P.-Y.; ELLEUCH, K.** Reverse deep drawing process: Material anisotropy and work-hardening effects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, v. 233, n. 4, p. 699-713, 2019.

**BITTENCOURT, Thiago Rangel.** Avaliação da conformabilidade e da resistência à indentação dos aços Interstitial Free High Strength Steel (IFHSS) e Bake Hardenable (BH) da classe de 260 MPa de limite de escoamento. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

**BOCK, M.; GARDNER, L.; REAL, E.** Material and local buckling response of ferritic stainless steel sections. *Thin-Walled Structures*, v. 89, p. 131–141, 2015.

**BOUCHAALA, K.; GHANAMEH, M. F.; FAQIR, M.; MADA, M.; ESSADIQI, E.** Numerical investigation of the effect of punch corner radius and die shoulder radius on the flange earrings for AA1050 and AA1100 aluminum alloys in cylindrical deep drawing process. *Heliyon*, v. 7, e06662, 2021.

**BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I. S.; GILMAR, B.** Conformação plástica dos metais. 6. ed. São Paulo: EPUSP, 2011.

**CALLISTER, William D., Jr.** Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

**CARBÓ, H. M.** Aços inoxidáveis: aplicações e especificações. São Paulo: ArcelorMittal, 2008. p. 1-29.

**CARNEIRO, Íris; SIMÕES, Sónia.** Recent Advances in EBSD Characterization of Metals. *Metals*, v. 10, p. 1097, 2020.

**CHANDRA, K.; KAIN, Vivekanand; SRINIVASAN, N.; SAMAJDAR, I.; BALASUBRAHMANIAN, A. K.** Temper embrittlement and corrosion behaviour of martensitic stainless steel 420. *Advanced Materials Research*, Suíça, n. 794, p. 757-765, 2013.

**CHARLES, J. et al.** The ferritic stainless steel family: the appropriate answer to nickel volatility *Metallurgical Research & Technology*, v. 106, n. 3, p. 124–139, mar. 2009.

**CHEMIN FILHO, Ravilson Antonio; MARCONDES, Paulo Victor Prestes.** Influence of die design on the sheet metal forming process. *Engenharia Revista*, v. 29, n. 1, p. 81-88, 2009.

**CHIAVERINI, V.** Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. ampliada e revista. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012. 599 p.

**COLGAN, Mark; MONAGHAN, John.** Deep drawing process: analysis and experiment. *Journal of Materials Processing Technology*, Dublin, v. 132, n. 1, p. 35-41, 2003.

**COSTA, Ricardo José Gonçalves; RODRIGUES, Daniella Gomes; ALVES, Hélio José Batista; OLIVEIRA, Tarcísio Reis; GONZALEZ, Berenice Mendonça.** Comparative study of microstructure, texture, and formability between 11CrTi and 11CrTi+Nb ASTM 409 ferritic stainless steel. *Materials Research*, v. 20, n. 4, p. 1593-1599, 2017.

**DESPRÉS, A.; MITHIEUX, J. D.; SINCLAIR, C. W.** Modelling the relationship between deformed microstructures and static recrystallization textures: Application to ferritic stainless steels. *Acta Materialia*, v. 219, p. 117226, 2021.

**DONG, Zhihai; TIAN, Ye; HAO, Tingting; LI, Yiwen; MIU, Junyan; CUI, Xinying; CHANG, Chenhe; CHANG, Yunlong.** Study on microstructure characterization and mechanical properties of AISI 444 ferritic stainless steel joint by high frequency pulse K-TIG welding. *Research Square*, 2023.

**EMAMI, S.; SAEID, T.** A comparative study on the microstructure development of friction stir welded 304 austenitic, 430 ferritic, and 2205 duplex stainless steels. *Materials Chemistry and Physics*, v. 121, p. 833-845, 2019.

**FILHO, A. F. et al.** Comportamento de resultados na variação de espessura entre ensaio e simulação do latão 70/30 laminado a frio no modo Nakazima em máquina de ensaios de fitas e chapas. In: *47º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos*, 2010, Belo Horizonte, MG.

**FOLLE, L. F. et al.** Escolha do lubrificante correto torna mais precisa a curva-limite de conformação. *Corte & Conformação de Metais*, p. 64–76, abr. 2008.

**GAO, F. et al.** Formation of recrystallization texture and its effect on deep drawability for high-purified ferritic stainless steel by two step cold rolling. *Materials and Design*, v. 226, p. 1-10, fev. 2023.

**GUIDA, Roberto Bamenga; CETLIN, Paulo Roberto.** Comparação da estampabilidade de chapas de aço inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio obtidas através de duas rotas de fabricação. In: 43º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 2006, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2006. p. 409-417.

**HAMADA, Jun-ichi; AGATA, Kazuyuki; INOUE, Hirofumi.** Estimation of planar anisotropy of the r-value in ferritic stainless steel sheets. *Materials Transactions*, v. 50, n. 4, p. 752-758, 2009.

**HAMADA, Jun-ichi; MATSUMOTO, Yoshinori; FUDANOKI, Fumio; MAEDA, Shigeru.** Effect of initial solidified structure on ridging phenomenon and texture in type 430 ferritic stainless steel sheets. *ISIJ International*, v. 43, n. 12, p. 1989-1998, 2003.

**INTERNATIONAL STAINLESS STEEL FORUM – ISSF.** The ferritic solution / The essential guide to ferritic stainless steels. 2007.

**LACHMAYER, Roland; BEHRENS, Bernd-Arno; EHLERS, Tobias; MÜLLER, Philipp; ALTHAUS, Philipp; OEL, Marcus; FARAHMAND, Ehsan; GEMBARSKI, Paul Christoph; WESTER, Hendrik; HÜBNER, Sven.** Process-integrated lubrication in sheet metal forming. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 6, n. 121, p. 1-24, 2022.

**LANGBEHN, Jamile Thön; SOUZA, Alexandre de Oliveira.** Determinação da curva limite de conformação do aço AISI 1008. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 8, n. 4, p. 26868-26877, abr. 2022.

**LI, R.; FU, B.; WANG, Y.; LI, J.; DONG, T.; LI, G.; ZHANG, G.; LIU, J.** Effect of cold-rolling reduction on recrystallization microstructure, texture and corrosion properties of the X2CrNi12 ferritic stainless steel. *Materials*, v. 15, n. 19, 2022.

**LIMA, Antonio Carlos da Silva; DAGOSTIM, Denis Kohler; ZAAGE, Luiz Alberto; CASAGRANDE, Pedro Augusto Smielevski; DALEFFE, Anderson.** *Survey of the*

*forming limit curve of SAE 1006 steel. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 8, n. 4, p. 31555-31562, 2022.*

**LIU, Houlong; LI, Huan; LIU, Chengze; WU, Junyu.** Effect of rolling reduction on microstructure and formability of a ferritic stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 33, n. 3, p. 1304-1313, fev. 2023.

**LORA, Fábio André.** Avaliação das Deformações no Aço DC04 Quando Submetido ao Processo Híbrido de Estampagem Incremental Posterior ao Processo Convencional. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS, 2014.

**LUIZ, Valmir Dias; SANTOS, Anderson Júnior dos; CÂMARA, Marcelo Araújo; RODRIGUES, Paulo César de Matos.** Influence of different contact conditions on friction properties of AISI 430 steel sheet with deep drawing quality. *Coatings*, v. 13, n. 4, p. 771, abr. 2023.

**LUMELSKYY, D. et al.** Numerical simulation of formability tests of pre-deformed steel blanks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 12, n. 2, p. 133–141, 2012.

**KIM, J.; KIM, H.; KIM, S.; LEE, J.; KIM, J.** Yield strength variation of pipe-forming processes: Bauschinger effect and strain hardening. *Scientific Reports*, v. 9, n. 14002, p. 1-10, 2019.

**KOBAYASHI, Shigeaki; et al.** Low-angle grain boundary engineering based on texture control for enhancement of corrosion and fatigue resistance in 436L type ferritic stainless steel. *Metal & Corrosion*, 2024.

**KOHL, Doris; MERKLEIN, Marion.** Determination of forming limit curves - strain path and failure analysis. *Key Engineering Materials*, v. 926, p. 947-954, 2022.

**MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L.; HU, S. J.** *Mechanics of sheet metal forming*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. p. XIII.

**MARCONDES, P. V. P.** *Conformação de chapas metálicas*. 2003.

**MARUMA, M.G.; SIYASIYA, C.W.; STUMPF, W.E.** Effect of cold reduction and annealing temperature on texture evolution of AISI 441. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 113, n. 2, p. 119-126, 2013.

**MATSUOKA, Yoshikazu; IWASAKI, Tatsuya; NAKADA, Nobuo; TSUCHIYAMA, Toshihiro; TAKAKI, Setsuo.** Effect of Grain Size on Thermal and Mechanical Stability of Austenite in Metastable Austenitic Stainless Steel. *ISIJ International*, v. 53, n. 7, p. 1224-1230, 2013.

**MESQUITA, Eduardo Luiz Alvares; Rugani, Léo Lucas.** Estampagem Dos Aços Inoxidáveis. 1997. 49 p.

**MISHRA, P.; AKERFELDT, P.; SVAHN, F.; NILSSON, E.; FOROUZANE, F.; ANTTI, M.-L.** Mechanical properties and microstructure evolution of L-PBF manufactured 21-6-9 stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 25, p. 1483-1494, 2023.

**MORAIS, F. L. D.; CORRÊA, E. C. S.; LOPES, W.** Effect of shear direction on work-hardening evolution of AISI 409 steel under rolling/shearing loading. *Materials Research*, v. 25, e20210398, 2022.

**NOONING, R. G.** *Effect of stabilizing elements on the precipitation behavior and phase stability of type 409 ferritic stainless steels.* 102 f. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – University of Pittsburgh, Pittsburgh, 2002.

**NÚÑEZ, A.; COLLADO, I.; DE LA MATA, M.; ALMAGRO, J. F.; SALES, D. L.** A combined microscopy study of the microstructural evolution of ferritic stainless steel upon deep drawing: the role of alloy composition. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 8, n. 6, p. 1-14, 2024.

**OLGUNER, Sadık; BOZDANA, A. Tolga.** The effect of friction coefficient on punch load and thickness reduction in deep drawing process. *International Journal of Materials*, [s.l.], v. 3, p. 64-68, 2016.

**PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C.** *Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades*. São Paulo: Ed. Hemus Limitada, 1994.

**PADMANABHAN, R.; OLIVEIRA, M.C.; ALVES, J.L.; MENEZES, L.F.** Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 43, n. 10, p. 1001-1010, 2007.

**PEREIRA, Maria.** Estudo sobre a conformação de metais. *Revista de Materiais*, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 45-50, jul. 2021.

**REDDY, A. C. Sekhara; RAJESHAM, S.; REDDY, P.** Limiting Drawing Ratio (LDR) in deep drawing by rapid determination method. *International Journal of Current Engineering and Technology*, v. 4, n. 2, p. 757-762, abr. 2014.

**ROCHA, M. R.** *Avaliação do efeito das transformações martensíticas na conformabilidade dos aços 304N e 304H*. 2006. [Tese de Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Materiais] – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

**ROMERO-RESENDIZ, L.; EL-TAWAY, M.; ZHANG, T.; ROSSI, M. C.; MARULANDA-CARDONA, D. M.; YANG, T.; AMIGÓ-BORRÁS, V.; HUANG, Y.; MIRZADEH, H.; BEYERLEIN, I. J.; HUANG, J. C.; LANGDON, T. G.; ZHU, Y. T.** Heterostructured stainless steel: Properties, current trends, and future perspectives. *Materials Science & Engineering R*, v. 150, p. 100691, 2022.

**SANTOS, Herbert Amarildo dos.** *Avaliação experimental da estampabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos da série 430 e simulação numérica do ensaio Nakazima*. 2003. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

**SCHULTE, R.; HILDENBRAND, P.; VOGEL, M.; LECHNER, M.; MERKLEIN, M.** Analysis of fundamental dependencies between manufacturing and processing Tailored Blanks in sheet-bulk metal forming processes. *Procedia Engineering*, v. 207, p. 305-310, 2017.

**SILVA, C. C.; MACHADO, J. P. S. E.; SOBRAL-SANTIAGO, A. V. C.; DE SANT'ANA, H. B.; FARIAS, J. P.** High-temperature hydrogen sulfide corrosion on the heat-affected zone of the AISI 444 stainless steel caused by Venezuelan heavy petroleum. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 59, n. 3-4, p. 219-225, 2007.

**SILVA, Juliano Walter; MAZZAFERRO, José Antônio Esmerio; MAZZAFERRO, Cíntia Cristiane Petry.** Avaliação de lubrificantes para estampagem utilizando o ensaio de estampabilidade. *Contribuição técnica ao 71º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 16º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 26 a 30 de setembro de 2016.

**SITU, Q.; JAIN, M. K.; METZGER, D. R.** Determination of forming limit diagrams of sheet materials with a hybrid experimental–numerical approach. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 53, p. 707-719, 2011.

**SUZUKI, S.; ONUKI, Y.; UCHIDA, M.; SATO, S.; NARUSE, T.; WATANABE, M.; SATO, T.; EBATA, T.** Grain growth in soft magnetic ferritic stainless steels under compressive stresses at high temperatures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1121, p. 012020, 2021.

**YVELL, K.; GREHK, T. M.; HEDSTRÖM, P.; BORGSTAM, A.; ENGBERG, G.** EBSD analysis of surface and bulk microstructure evolution during interrupted tensile testing of a Fe-19Cr-12Ni alloy. *Materials Characterization*, v. 141, p. 8-18, 2018.

**ZEIN, H.; EL-SHERBINY, M.; ABD-RABOU, M.; EL SHAZLY, M.** Effect of die design parameters on thinning of sheet metal in the deep drawing process. *American Journal of Mechanical Engineering*, v. 1, n. 2, p. 20-29, 2013.

**ZHAO, Jingwei; JIANG, Zhengyi; WANG, Zhihua; SANG, Shengbo; DOBRZAŃSKI, Leszek A.; YANG, Ming; MA, Xiaoguang; WANG, Yongzhen.** Uma análise de microdesenho profundo do aço inoxidável ferrítico 430 usando o método de elementos finitos de plasticidade cristalina. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 20, p. 2247-2261, 2022.