



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JAQUELINE MIRANDA SILVA

ESTAMPAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 430

BELO HORIZONTE

2012

JAQUELINE MIRANDA SILVA

ESTAMPAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 430

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: prof. Wellington Lopes
Coorientador: prof^ª. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

BELO HORIZONTE

2012

JAQUELINE MIRANDA SILVA

ESTAMPAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 430

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 12 de Novembro de 2012

BANCA EXAMINADORA

Prof. Wellington Lopes – Orientador

Prof^a. Elaine Carballo Siqueira Corrêa - Coorientador

Prof. Joel Romano Brandão

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família e aos meus amigos pelo apoio e paciência.

Em especial agradeço aos professores Wellington Lopes e Joel Romano Brandão pela ajuda incalculável, e à professora Elaine Carballo Siqueira Corrêa pelo auxílio sempre que necessário.

Por fim, agradeço a mim pelo empenho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVO	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	Aços inoxidáveis.....	19
	3.1.1 Aços inoxidáveis ferríticos	22
	3.1.2 Processamento dos aços inoxidáveis ferríticos	26
3.2	Conformação Mecânica de chapas.....	29
	3.2.1 Corte.....	32
	3.2.2 Dobramento	33
	3.2.3 Estiramento	35
	3.2.4 Estampabilidade	37
	3.2.5 Embutimento profundo ou estampagem profunda.....	40
	3.2.5.1 Variáveis do processo.....	44
	3.2.5.2 Ferramentas utilizadas	50
	3.2.5.3 Tipos específicos de embutimento	53
3.3	Técnicas de caracterização	54
	3.3.1 Caracterização microestrutural.....	55
	3.3.2 Difração de raios-X.....	58
	3.3.3 Ensaios destrutivos.....	58
	3.3.4 Tratamento térmico	60

4	METODOLOGIA	62
4.1	Material.....	62
4.2	Caracterização mecânica.....	62
4.2.1	<i>Pré-deformação em tração</i>	<i>63</i>
4.2.2	<i>Anisotropia</i>	<i>64</i>
4.3	Calandragem.....	66
4.4	Tratamento Térmico.....	67
4.5	Estampagem.....	68
4.6	Caracterização microestrutural	71
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.1	Caracterização da composição química.....	74
5.2	Caracterização mecânica.....	74
5.2.1	<i>Anisotropia</i>	<i>75</i>
5.3	Caracterização microestrutural	78
5.3.1	<i>Estado como recebido.....</i>	<i>78</i>
5.3.2	<i>Recozido</i>	<i>79</i>
5.3.3	<i>Material estampado</i>	<i>80</i>
5.3.4	<i>Material estampado (com tratamento térmico anterior à estampagem)</i> <i>.....</i>	<i>82</i>
5.3.5	<i>Rotas calandragem/estampagem e tração/estampagem (com e sem</i> <i>tratamento térmico prévio)</i>	<i>84</i>
5.3.6	<i>Rota tração/calandragem/estampagem (com e sem tratamento térmico</i> <i>prévio)</i>	<i>89</i>
5.4	Distribuição da deformação	93
6	CONCLUSÕES	94
7	REFERÊNCIAS	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Bobina de aço inoxidável. Fonte: ACESITA, 2006, p. 2.....	19
Figura 3.2 - Diagrama de Schaeffler. Fonte: COLPAERT, 2008, p. 524	22
Figura 3.3 - Esquema da classificação dos processos de conformação. Fonte: BRESCIANI, 2011, p. 14.....	30
Figura 3.4 - Ferramentas básicas do processo de estampagem. Fonte: MORO e AURAS, 2011, p. 30.....	31
Figura 3.5 - Exemplo de distribuição de força de corte em uma chapa. Fonte: MORO e AURAS, 2011, p. 22.....	33
Figura 3.6 - Esforços mecânicos atuantes no dobramento. Fonte: MORO e AURAS, 2011, p. 25.....	34
Figura 3.7 - Alteração do ângulo de dobramento devido ao retorno elástico. Fonte: MORO e AURAS, 2011, p. 27.....	34
Figura 3.8 - Processo de estiramento de uma chapa. Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1301.....	35
Figura 3.9 - Exemplo de estiramento em matriz simétrica. Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1301.....	36
Figura 3.10 - Ensaio simulativos: (a) Ensaio Erichsen e Olsen, (b) Ensaio Swift e (c) Ensaio Fukui. Fonte: FERREIRA, 2011, p. 3.....	37
Figura 3.11 - Embutimento profundo de um copo. Fonte: MORO e AURAS, 2011, p. 30. ...	40
Figura 3.12 - Blanque e a peça já estampada. Fonte: FERREIRA, 2011, p. 7.....	41
Figura 3.13 - Representação do fluxo metálico no processo de embutimento profundo. Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1265.....	42
Figura 3.14 - Exemplo de enrugamento formado na estampagem de uma chapa. Fonte: Produzido pela Autora	46
Figura 3.15 - Ejeção de uma peça estampada. Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1296.....	49
Figura 3.16 - Matriz de ação simples. Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1271.....	50
Figura 3.17 - Matriz de dupla ação. Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1271.....	50
Figura 3.18 - Matriz progressiva. Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1272.	51
Figura 3.19 - Matriz múltipla com mecanismo de transferência. Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1273.	51

Figura 3.20 - Estampagem de uma peça com formato esférico. Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1289.....	54
Figura 3.21 - Microscópio óptico BX-51 da Olympus. Fonte: USP, 2011.....	55
Figura 3.22 - Metalizadora Quick Coater. Fonte: Produzido pela Autora.....	56
Figura 3.23 - Esquema do funcionamento do microscópio eletrônico de varredura. Fonte: USP, 2011.....	57
Figura 3.24 - Fenômeno da difração. Fonte: COSTA, 2006, p. 34.	58
Figura 3.25 - Corpo de prova para ensaio de tração. Fonte: CÂNDIDO, 2003, p. 101.....	59
Figura 3.26 - Durômetro Rockwell. Fonte: Produzido pela Autora.	60
Figura 3.27 - Alteração das propriedades do material em função da recuperação, recristalização e do crescimento de grão. Fonte: BRESCIANI, 2011, p. 126.....	60
Figura 4.1 - Desenho do corpo de prova de tração utilizado nos ensaios para a caracterização mecânica do aço AISI 430, medidas em milímetros. Fonte: Produzido pela Autora.....	63
Figura 4.2 - Desenho do corpo de prova de tração utilizado para a pré-deformação em tração do aço AISI 430 para posterior processamento deste material, medidas em milímetros. Fonte: Produzido pela Autora	63
Figura 4.3 - Dispositivo utilizado para o ensaio de tração em chapas largas. Fonte: Produzido pela Autora	64
Figura 4.4 - Corpo de prova utilizado para verificar a anisotropia do material. Fonte: Produzido pela Autora	65
Figura 4.5 - Blanques: (a) no estado como recebido, (b) após o procedimento de calandragem. Fonte: Produzido pela Autora.....	67
Figura 4.6 - Forno Brasimet (forno tipo mufla). Fonte: Produzido pela Autora.....	67
Figura 4.7 - (a) blanque e (b) matriz usados para a estampagem do aço AISI 430. Fonte: Produzido pela Autora	68
Figura 4.8 - Processo de preparação dos corpos de prova: (a) guilhotina (b) tesoura mecânica (c) esmeril (d) lixa. Fonte: Produzido pela Autora	69
Figura 4.9 - Equipamento para a estampagem: (a) prensa mecânica Gutmann, (b) punção e (c) matriz. Fonte: Produzido pela Autora.....	69
Figura 4.10 - Cortadeira metalográfica do laboratório de Metalografia. Fonte: Produzido pela Autora.....	71
Figura 4.11 - Apresentação dos equipamentos utilizados na análise microestrutural do aço AISI 430: a) lixadeira Struers, b) politriz Struers e c) microscópio óptico Kontrol. Fonte: Produzido pela Autora	72

Figura 4.12 - Microscópio de varredura por feixe de elétrons (MEV), Superscan SSX 550, Shimadzu. Fonte: Produzido pela Autora	73
Figura 4.13 - Corpo de prova estampado com a identificação das regiões que foram retiradas amostras para a análise microestrutural. Fonte: Produzido pela Autora.....	73
Figura 5.1 - Gráfico de tensão convencional x deformação convencional do aço AISI 430. Fonte: Produzido pela Autora.....	75
Figura 5.2 - Corpo de prova retirado na direção de 0° da direção de laminação: (a) antes do ensaio de tração e (b) após o ensaio de tração. Fonte: Produzido pela Autora	76
Figura 5.3 - Corpo de prova retirado na direção de 45° da direção de laminação: (a) antes do ensaio de tração e (b) após o ensaio de tração. Fonte: Produzido pela Autora	76
Figura 5.4 - Corpo de prova retirado na direção de 90° da direção de laminação: (a) antes do ensaio de tração e (b) após o ensaio de tração. Fonte: Produzido pela Autora	76
Figura 5.5 - Gráfico de tensão convencional x deformação convencional dos corpos de provas a 0°, 45° e 90° da direção de laminação da chapa. Fonte: Produzido pela Autora.....	77
Figura 5.6 - Fotomicrografias do aço AISI 430 no estado como recebido com ampliação de: (a) 200x e (b) 400x. Fonte: Produzido pela Autora.....	78
Figura 5.7 - Fotomicrografias do aço AISI 430 no estado como recebido obtidas por microscopia de varredura com ampliação de: (a) 1000x e b) 2000x. Fonte: Produzido pela Autora.....	79
Figura 5.8 - Fotomicrografias do aço AISI 430 recozido com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora	79
Figura 5.9 - Fotomicrografias do aço AISI 430 como recebido (região do fundo) que foi estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora.....	80
Figura 5.10 - Fotomicrografias do aço AISI 430 como recebido (região da quina) que foi estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora.....	81
Figura 5.11 - Fotomicrografias do aço AISI 430 como recebido (região da borda) que foi estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora.....	81
Figura 5.12 - Amostras do AISI 430 no estado como recebido: (a) antes da estampagem, (b) após a estampagem. Fonte: Produzido pela Autora.....	82
Figura 5.13 - Fotomicrografias do aço AISI 430 recozido e estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora	83

Figura 5.14 - Amostras do AISI 430: a) recozido e b) recozido e estampado. Fonte: Produzido pela Autora	83
Figura 5.15 - Fotomicrografias do aço AISI 430 calandrado ($e = 0,076$) e estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora.....	84
Figura 5.16 - Amostras do aço AISI 430: (a) calandrado ($e = 0,076$) e (b) calandrado ($e = 0,076$) e estampado. Fonte: Produzido pela Autora.....	85
Figura 5.17 - Fotomicrografias do aço AISI 430 tracionado ($e = 0,012$) e estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora.....	86
Figura 5.18 - Amostras do AISI 430: (a) tracionado de $e = 0,012$ e b) tracionado ($e = 0,012$) e estampado. Fonte: Produzido pela Autora	86
Figura 5.19 - Fotomicrografias do aço AISI 430 recozido, tracionado ($e = 0,021$, amostra 1) e estampado com ampliação de: a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora.....	87
Figura 5.20 - Amostras do AISI 430: (a) recozido e tracionado ($e = 0,021$) e (b) recozido, tracionado ($e = 0,021$) e estampado. Fonte: Produzido pela Autora.....	88
Figura 5.21 - Fotomicrografias do aço AISI 430 recozido, calandrado ($e = 0,113$) e estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora ...	88
Figura 5.22 - Amostras do AISI 430: a) recozido e calandrado ($e = 0,113$) e b) recozido, calandrado ($e = 0,113$) e estampado. Fonte: Produzido pela Autora.....	89
Figura 5.23 - Fotomicrografias do aço AISI 430 tracionado ($e = 0,019$, amostra 3), calandrado ($e = 0,164$, deformação total de $e = 0,183$) e estampado com ampliação de: a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora	90
Figura 5.24 - Amostras do AISI 430: a) tracionado ($e = 0,019$) e calandrado ($e = 0,164$) e b) tracionado ($e = 0,019$), calandrado ($e = 0,164$) e estampado. Fonte: Produzido pela Autora..	90
Figura 5.25 - Fotomicrografias do aço AISI 430 tracionado ($e = 0,012$, amostra 4), calandrado ($e = 0,172$, deformação total de $e = 0,184$) e estampado com ampliação de: a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora	91
Figura 5.26 - Amostras do AISI 430: a) tracionado ($e = 0,012$) e calandrado ($e = 0,172$) e b) tracionado ($e = 0,012$), calandrado ($e = 0,172$) e estampado. Fonte: Produzido pela Autora..	91
Figura 5.27 - Fotomicrografias do aço AISI 430 recozido, tracionado ($e = 0,014$, amostra 2), calandrado ($e = 0,164$, deformação convencional total de $0,178$) e estampado com ampliação de: a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x. Fonte: Produzido pela Autora.....	92

Figura 5.28 - Amostras do AISI 430: a) recozido, tracionado ($e = 0,014$) e calandrado ($e = 0,164$) e b) recozido, tracionado ($e = 0,014$), calandrado ($e = 0,164$) e estampado. Fonte: Produzido pela Autora92

Figura 5.29 - Distribuição da deformação nos copos embutidos, pelas rotas: a) estampado, b) tracionado e estampado, c) tracionado, calandrado e estampado, d) recozido, calandrado e estampado, e) recozido, tracionado e estampado e f) recozido, tracionado, calandrado e estampado. Fonte: Produzido pela Autora.93

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Elementos químicos presentes nos aços inoxidáveis ferríticos. Fonte: ACESITA, 2006, p. 5.....	23
Tabela III.2 - Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis ferríticos. Fonte: ACESITA, 2006, p. 6.....	25
Tabela III.3 - Propriedades principais dos aços inoxidáveis ferríticos. Fonte: ACESITA, 2006, p. 8.....	26
Tabela III.4 - Propriedades físicas dos aços inoxidáveis ferríticos. Fonte: ACESITA, 2006, p. 9.....	28
Tabela III.5 - Principais aplicações dos aços inoxidáveis ferríticos. Fonte: ACESITA, 2006, p. 10.....	29
Tabela III.6 - Valores típicos dos coeficientes de anisotropia e da anisotropia normal média. Fonte: CÂNDIDO, 2003, p. 63.....	48
Tabela V.1 - Composição química do aço AISI 430 (tipo 430A, % em peso). Fonte: Produzido pela Autora	74
Tabela V.2 - Propriedades mecânicas do aço AISI 430 medidas a 0°. Fonte: Produzido pela Autora.....	75
Tabela V.3 - Valores dos fatores de anisotropia, da anisotropia normal média (R _m) e da anisotropia planar ΔR para o aço AISI 430 no estado como recebido. Fonte: Produzido pela Autora.....	76
Tabela V.4 - Propriedades mecânicas do aço AISI 430 medidas a 0°, 45° e 90°. Fonte: Produzido pela Autora	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ΔR = anisotropia planar

A = área da seção transversal

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI = *American Iron and Steel Institute*

ASTM = *American Society for Testing and Materials*

AU = alongamento uniforme

CCC = estrutura cristalina cúbica de corpo centrado

CFC = estrutura cristalina cúbica de faces centradas

e = deformação convencional

EDS = espectroscopia de raios-X dispersivo em energia

LDR = limite de estampabilidade

LE = tensão limite de escoamento

LRT = tensão limite de resistência à tração

MET = microscopia eletrônica de transmissão

MEV = microscopia de varredura por feixe de elétrons

NBR = norma brasileira

R = fator de anisotropia ou coeficiente de Lankford

R_{0° = fator de anisotropia medido a 0° em relação à direção de laminação

R_{45° = fator de anisotropia medido a 45° em relação à direção de laminação

R_{90° = fator de anisotropia medido a 90° em relação à direção de laminação

R_L = anisotropia na direção longitudinal da direção de laminação da chapa

R_m = anisotropia normal média

R_T = anisotropia na direção transversal da direção de laminação da chapa

SAE = *Society of Automotive Engineers*

LISTA DE SÍMBOLOS

= número mesh

Π = pi

RESUMO

Os aços inoxidáveis são ligas que possuem um percentual mínimo de 11% (em peso) de cromo necessário à criação de uma camada de passivação responsável pela resistência à corrosão destes materiais. Dentre os grupos de aços inoxidáveis, destacam-se os aços inoxidáveis ferríticos, sendo o AISI 430 o tipo mais comum desta classe de aços inoxidáveis para ser utilizado em operações de estampagem de chapas, como a fabricação de utensílios domésticos, de eletrodomésticos e na cunhagem de moedas, devido a sua boa estampabilidade. Deste modo, com o objetivo de investigar os arranjos macro e microestrutural apresentados pelo aço AISI 430 (tipo 430A) após a operação de embutimento, fez-se o estudo em função do estado deste material, ou seja, como recebido, apenas recozido (900°C durante 25 minutos) e processado mecanicamente (pré-deformado em tração e em calandragem, com a aplicação intermediária destes esforços) e termicamente por recozimento. Os resultados indicaram que o arranjo microestrutural dos copos embutidos foi semelhante ao observado no estado como recebido do aço AISI 430. A deformação plástica por calandragem ocasionou o aparecimento de uma orientação cristalográfica preferencial e a formação do fenômeno de “orelhamento”, contudo, para todos os procedimentos de estampagem investigados, não foi observada a formação de trincas no aço inoxidável ferrítico.

Palavras-chave: Aço Inoxidável. Estampagem. Orelhamento.

ABSTRACT

The stainless steels are alloys that present a minimum percentage of 11% (in weight) of chromium necessary to create a passivation layer responsible by the corrosion resistance of these materials. The ferritic stainless steels are the most common grade of stainless steel and the AISI 430 type is commonly used in forming operations, such as deep drawing for domestic and household appliances production and coining due to its good formability. This manner, the main of this work was investigate the macro and microstructural arrangements presented by the AISI 430 (grade AISI 430A) ferritic stainless steel after deep drawing operations considering the initial state of this material, i.e., as received, only annealed (900°C during 25 minutes) and mechanically processed (pre-strained by tension and by calendaring applied direct or combined with tension) and heat treated by annealing. The results indicated that the microstructural aspects presented by the die stamped cups were similar to the AISI 430 steel in the as received condition. The plastic deformation by calendaring led to the development of wrinkles (earing). However, for all forming procedures investigated, the occurrence of cracks in the ferritic stainless steel was not observed.

Key-words: Stainless Steels. Deep Drawing. Wrinkles

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são ligas que possuem, principalmente, um percentual mínimo de 11% (em peso) de cromo. Outros elementos de liga podem estar presentes nestes aços, como o níquel, o molibdênio, o nióbio e o carbono. Cada elemento melhora uma propriedade específica nos aços inoxidáveis, como o aumento da resistência à oxidação e à corrosão pela adição de cromo e da resistência mecânica pelo acréscimo de níquel.

Dentre os grupos de aços inoxidáveis, destacam-se os aços inoxidáveis ferríticos pelo fato destes possuírem teor de níquel inferior ao registrado pelos aços inoxidáveis austeníticos, por apresentarem microestrutura ferrítica em todas as temperaturas, baixo teor de carbono e serem magnéticos.

O aço AISI (*American Iron and Steel Institute*) 430 é o tipo mais comum de aço inoxidável ferrítico. Este aço é utilizado na fabricação de utensílios domésticos (pias e talheres), de eletrodomésticos (portas e cabines de fogões, de geladeiras e de máquinas de lavar roupas, por exemplo) e na cunhagem de moedas.

Como destacado, este material é amplamente utilizado na fabricação de objetos comuns, sendo necessário, portanto, que o mesmo seja submetido a diferentes processos de conformação mecânica para alterar a forma e as dimensões do mesmo.

Neste caso, para a transformação mecânica do material será necessária a aplicação de esforços diferentes, encontrados em diferentes operações de conformação, como a laminação, o forjamento, a extrusão, a trefilação e a estampagem.

A estampagem de chapas é muito empregada nas indústrias pela variabilidade de forma dos seus produtos e pela rapidez do processamento do material. De modo simplificado, nesta operação a chapa adquire a forma de uma matriz pela aplicação de esforços mecânicos com o auxílio ferramentas (prensas e punção).

O processo de embutimento profundo representa um tipo de estampagem na qual o produto apresenta formas geométricas com saliências profundas ou rasas. Dentre estes produtos podem-se citar as painéis, as caixas ou os containeres, os para-lamas e as portas de carros.

Contudo, para assegurar o melhor aproveitamento do material em termos de limite de forma geométrica e da redução de perdas por diferentes motivos, é necessário que os materiais que serão utilizados nas operações de estampagem sejam avaliados previamente em termos do limite de deformação e do acabamento superficial após a aplicação dos esforços mecânicos.

Neste caso, técnicas diferentes de ensaios mecânicos são aplicadas para o estudo da estampabilidade das chapas, como os testes de tração uniaxial, que permitem a caracterização mecânica do material em termos dos parâmetros de resistência mecânica e de ductilidade, além de avaliar a anisotropia dos materiais; a montagem das curvas limite de conformação e testes para a determinação do coeficiente de atrito e os ensaios de dobramento.

Outras técnicas de caracterização são utilizadas para avaliar características específicas do material, como os ensaios de cisalhamento, os testes de dureza e os ensaios não destrutivos.

Considerando o exposto, este trabalho pretende investigar a estampagem do aço inoxidável AISI 430 mediante a condução de uma operação de estampagem por embutimento sem o uso de prensa-chapas, em função das condições prévias do material (tratado termicamente e deformado plasticamente), indicando as condições consideradas críticas para esta operação realizada em ambiente laboratorial.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi identificar os aspectos macro e microestruturais assumidos pelo aço inoxidável ferrítico AISI 430 (tipo 430A) após a operação de estampagem (embutimento) para diferentes condições do mesmo.

Neste caso, avaliou-se a influência do estado inicial do aço AISI 430 como recebido, recozido (aquecimento a 900°C durante 25 minutos) e processado mecanicamente (pré-deformado em tração e em calandragem) quanto à anisotropia das chapas, ao arranjo microestrutural e à formação de imperfeições superficiais (trincas e “orelhamentos”).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços Inoxidáveis

Aço compreende uma liga que apresenta, dentre os principais elementos químicos, ferro e carbono (teor máximo de até 2,11% em peso), além de impurezas (enxofre, por exemplo) comuns do processo siderúrgico e outros elementos de liga necessários à obtenção de propriedades específicas, como o cromo usado para aumentar a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis.

Os aços inoxidáveis (figura 3.1) são ligas de Fe-Cr que apresentam percentual mínimo de 11% (em peso) de cromo. A presença deste elemento garante resistências à oxidação e à corrosão elevadas, devido ao fenômeno da passivação (formação de uma película de óxido de cromo que protege o material contra a ação corrosiva de diferentes meios).

Figura 3.1 - Bobina de aço inoxidável.



Fonte: ACESITA, 2006, p. 2.

O fenômeno da passivação baseia-se na reação do cromo com o oxigênio do ambiente, formando um filme fino e aderente que reduz os danos dos ataques corrosivos ao material. Este filme é conhecido como filme passivo e tem sua resistência à corrosão aumentada com o acréscimo do teor de cromo na composição química do aço inoxidável (CÂNDIDO, 2003).

A presença de outros elementos de liga nos aços inoxidáveis como o níquel, o molibdênio e o nióbio, possibilita a melhoria de propriedades específicas, como o aumento da

resistência mecânica, da resistência à corrosão em meios naftênicos e a redução do aparecimento de defeitos superficiais em aços inoxidáveis ferríticos, respectivamente.

Os aços inoxidáveis se destacam não só pela resistência que os mesmos apresentam em termos da resistência ao ataque corrosivo, mas por manter essa propriedade em temperaturas elevadas (aços inoxidáveis austeníticos) e conciliarem resistência à corrosão e mecânica (aços inoxidáveis martensíticos e austeno-ferríticos), por exemplo.

Os aços inoxidáveis são divididos em grupos, baseados principalmente na fase constituinte predominante na microestrutura:

a) aços inoxidáveis martensíticos: são ligas que apresentam como elementos principais o ferro e o cromo (teor, em peso, variando entre 11% a 18%) com teor de carbono acima de 0,1%. Um subgrupo destes aços é o aço inoxidável supermartensítico que possui teor de carbono abaixo de 0,1%. Estes aços são endurecíveis por tratamento térmico (têmpera) e são magnéticos. Quando temperados são extremamente duros, resistentes à corrosão e pouco dúcteis. Exemplos de aços deste grupo: AISI 403, AISI 410, AISI 414, AISI 416, AISI 420, AISI 431, AISI 440A, B e C, AISI 501, dentre outros (COLPAERT, 2008);

b) aços inoxidáveis ferríticos: novamente, os principais elementos desta liga são o ferro e o cromo (teor, em peso, variando entre 11% a 27%) com microestrutura ferrítica em todas as temperaturas (estrutura cúbica de corpo centrado - CCC), mas não endurecem por tratamento térmico e são magnéticos. Geralmente, estes aços apresentam menor custo que os aços inoxidáveis austeníticos por terem teor de níquel menor que estes últimos. Em termos de aplicação, estes aços são usados na fabricação de utensílios de cozinha (pias, por exemplo), na indústria automobilística (sistemas de exaustão de gases), dentre outros (CÂNDIDO, 2003). O teor de cromo é maior e o de carbono menor que o encontrado nos aços inoxidáveis martensíticos. Exemplos de aços deste grupo: AISI 405, AISI 409, AISI 430 (A, E, F), AISI 446, AISI 502, dentre outros (COLPAERT, 2008). Maiores detalhes sobre este tipo de aço serão dados a seguir;

c) aços inoxidáveis austeníticos: em termos dos principais elementos da composição química destes aços citam-se o ferro, o cromo (teor, em peso, variando entre 16% a 30%) e o níquel (teor, em peso, variando entre 8% a 35%). O teor de carbono é inferior a 0,08%. Em termos de arranjo estrutural, estes aços apresentam a estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC), exibindo condição propícia à conformação de barras e chapas por apresentarem deformação elevada até o início da deformação plástica (taxa de encruamento elevada). Destaca-se ainda o fato destes aços terem boa resistência à corrosão, serem não magnéticos e apresentarem tenacidade suficiente ao uso em temperaturas baixas (deve-se considerar outros

parâmetros para definir o uso). Estes aços são utilizados nos setores da construção civil, de bens de consumo duráveis, da indústria petroquímica, dentre outros (CÂNDIDO, 2003). Os principais aços desta família são os aços: AISI 301, AISI 302, AISI 304, AISI 304L, AISI 308, AISI 310, AISI 316, AISI 316L, AISI 317, AISI 321, AISI 347, dentre outros (COLPAERT, 2008);

d) aços inoxidáveis austeno-ferríticos (dúplex): são os aços que apresentam austenita e ferrita em frações aproximadamente idênticas em temperatura ambiente. Estes aços possuem composição química balanceada de ferro, de cromo (teor em peso variando de 18% a 27%), de níquel (teor em peso variando de 4% a 7%), de molibdênio (teor em peso variando de 1% a 4%) e de nitrogênio. Como exemplos de aços deste grupo, citam-se os aços: AISI 329, dentre outros (COLPAERT, 2008);

e) aços inoxidáveis endurecidos por precipitação: assim como destacado em outros aços inoxidáveis, os principais elementos químicos desta liga são o ferro, o cromo (teor em peso variando de 12% a 17%), o níquel (teor em peso variando de 4% a 8%), o molibdênio (teor em peso de até 2%), assim como outros que favoreçam o endurecimento da martensita pela precipitação de compostos intermetálicos (alumínio, cobre, titânio e nióbio) (COLPAERT, 2008).

A microestrutura dos aços inoxidáveis depende da composição química e do tratamento térmico aplicado aos mesmos. Neste caso, são empregadas representações das relações de fases em função da composição química para determinar as faixas de composição química aproximada de cada família de aços inoxidáveis. Uma dessas representações é a do diagrama de Schaeffler e DeLong, na qual os elementos estabilizadores da estrutura CCC são relacionados em um valor de “cromo equivalente” e os elementos estabilizadores de CFC em um valor de “níquel equivalente” (COLPAERT, 2008).

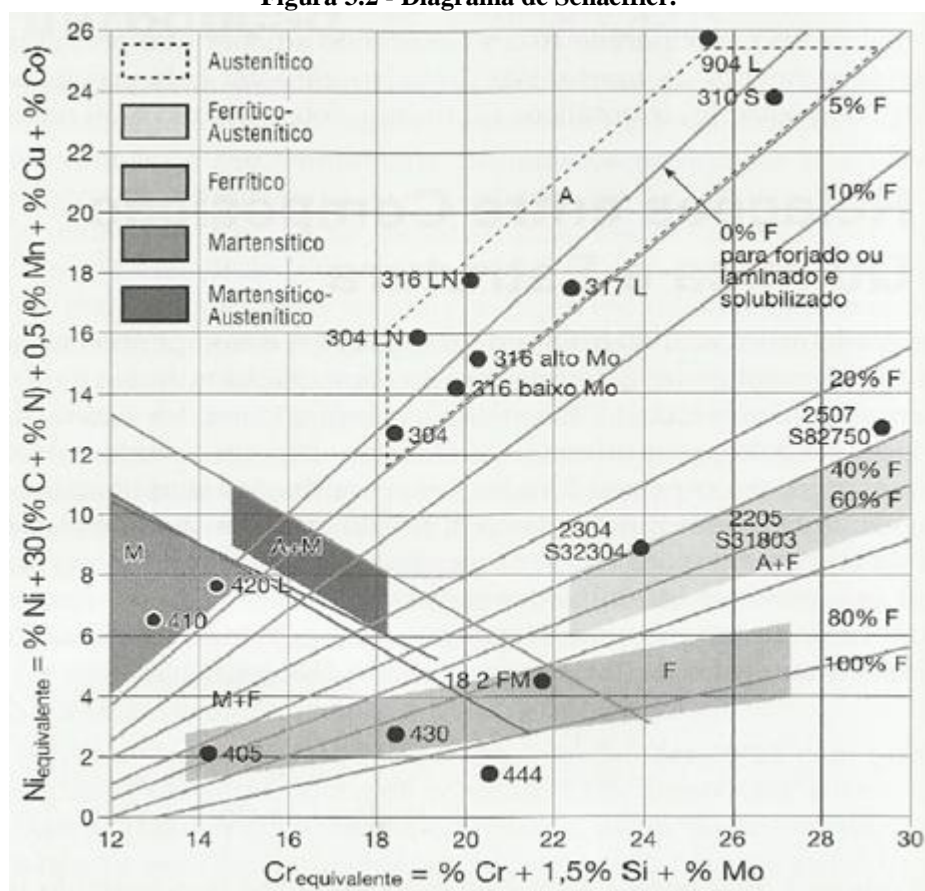
O cálculo do teor de cromo e de níquel em termos da presença destes e de outros elementos, cromo e níquel equivalente, é expresso pelas equações (3.1) e (3.2):

$$Cr_{\text{equivalente}} = \% Cr + 1,5 \times \% Si + \% Mo \quad (3.1)$$

$$Ni_{\text{equivalente}} = \% Ni + 30 \times (\% C + \% N) + 0,5 \times (\% Mn + \% Cu + \% Co) \quad (3.2)$$

A figura 3.2 apresenta o diagrama de Schaeffler, o qual mostra as faixas de cada família de aços inoxidáveis (COLPAERT, 2008).

Figura 3.2 - Diagrama de Schaeffler.



Fonte: COLPAERT, 2008, p. 524

Os aços inoxidáveis ferríticos estão situados à direita do campo austeníticos no diagrama Fe-Cr-C e sua estrutura consiste de ferrita em todas as temperaturas (COLPAERT, 2008).

As principais características dos aços inoxidáveis incluem o fato de os mesmos serem recicláveis, inertes e resistentes à corrosão, além de exibirem resistências mecânica e à corrosão em temperaturas elevadas (entre 500°C e 800°C, de acordo com a composição química).

3.1.1 Aços inoxidáveis ferríticos

Os principais elementos químicos presentes nos aços inoxidáveis ferríticos são: o carbono (C), o manganês (Mn), o silício (Si), o fósforo (P), o enxofre (S), o cromo (Cr), o níquel (Ni), o molibdênio (Mo), o nióbio (Nb), o titânio (Ti) e o nitrogênio (N). A porcentagem destes elementos nos diferentes tipos de aços inoxidáveis ferríticos está representada na tabela (tabela III. 1) a seguir (ACESITA, 2006).

Tabela III. 1 - Elementos químicos presentes nos aços inoxidáveis ferríticos.

AISI	ACESITA	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	N ₂ (%)	Outros (%)
409	P409A	0,03	1,00	1,00	0,04	0,02	10,5 a 11,7	0,50	-	0,03	$6(C+N_2) \leq Ti \leq 0,50$
430	P430A	0,12	1,00	1,00	0,04	0,03	16,0 a 18,0	0,75	-	-	-
-	P430E	0,12	1,00	1,00	0,04	0,03	16,0 a 18,0	0,75	-	-	Nb = 0,60 máx.
439	P439A	0,03	1,00	1,00	0,04	0,03	17,0 a 19,0	0,50	-	0,03	$0,20 + 4(C + N_2) \leq Ti + Nb \leq 0,75$
441	P441A	0,03	1,00	1,00	0,04	0,015	17,5 a 18,5	-	-	0,10	$3C + 0,30 \leq Nb \leq 1,00$ Ti = 0,10 a 0,60
-	P434A	0,025	1,00	1,00	0,04	0,03	17,5 a 19,5	1,00	1,75 a 2,50	0,035	$0,20 + 4(C+N_2) \leq Ti + Nb \leq 0,80$

Fonte: ACESITA, 2006, p. 5.

Os elementos de liga presentes nos aços inoxidáveis ferríticos atuam de modo diferente nas propriedades destes materiais. O molibdênio, por exemplo, é um estabilizador da ferrita, assim como o silício e o alumínio. Este elemento aumenta a resistência à corrosão e reduz a formação de fissuras nos aços ferríticos. Já o carbono e o nitrogênio estabilizam a austenita, com isso, aumentam a solubilidade do Cr na austenita. Por sua vez o nióbio e o titânio são fortes estabilizadores da ferrita, formam carbonetos e nitretos com o carbono e o nitrogênio presentes na solução, além de aumentarem a resistência à corrosão intergranular (CÂNDIDO, 2003).

Geralmente, o carbono nos aços inoxidáveis ferríticos é mantido baixo, com teor menor que 0,08% (em peso), propiciando dureza menor e ductilidade alta, além de prevenir a formação da austenita, pois a diminuição do teor de carbono causa a diminuição do campo austenítico (CÂNDIDO, 2003).

Carbono e nitrogênio aumentam a resistência mecânica dos aços e quando combinados com elementos que formam nitretos e carbonetos, apresentam partículas que restringem o crescimento de grão e melhoram a tenacidade ao impacto (CÂNDIDO, 2003).

Aços inoxidáveis que não contêm níquel são totalmente ferríticos até o ponto de fusão. Contudo, na presença de 0,1% C e em temperaturas acima de 1000°C, eles já passam a ser constituídos de ferrita e um pouco de austenita. A quantidade de austenita presente nos aços ferríticos depende dos teores de carbono e nitrogênio e das quantidades relativas dos elementos formadores de austenita e de ferrita (CÂNDIDO, 2003).

O aumento da temperatura faz com que a quantidade de austenita inicialmente sofra um aumento e depois diminua. Em temperaturas acima de 1150°C, os aços voltam a ser completamente ferríticos e o crescimento de grão é acentuado. Com o resfriamento, a austenita precipita nos contornos de grão da ferrita, como uma estrutura de Widmanstattein (CÂNDIDO, 2003).

O crescimento de grão dos aços inoxidáveis ferríticos é rápido, devido à grande mobilidade atômica na estrutura cúbica de corpo centrado destes aços (CÂNDIDO, 2003).

As principais propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis ferríticos produzidos comercialmente estão apresentadas na tabela III. 2 (ACESITA, 2006).

Tabela III. 2 - Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis ferríticos.

AISI	Acesita	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento 50 mm (%)	Dureza Rockwell-B (HRB)	Limite de Fadiga (MPa)	Embutimento Erichsen (mm)
409	P409A	330	200	32	74	-	10
430	P430A	450	250	22	88	-	9
-	P430E	450	250	28	85	-	8
-	P439A	420	240	28	85	-	9
-	P441A	440	250	20	80	-	10
-	P444A	490	337	32	85	-	10

Fonte: ACESITA, 2006, p. 6.

Considerando os processamentos siderúrgicos e de conformação mecânica aplicados aos aços inoxidáveis ferríticos, pode-se apresentar o seguinte resumo destas atividades (CÂNDIDO, 2003):

- a) aciaria: local onde as matérias primas (ferro, cromo, carbono, níquel e outros) iniciam o processo de fabricação do aço. No processo tradicional, a fusão e o refino são realizados em fornos elétricos, no qual o aumento de temperatura favorece a descarburização sem oxidar excessivamente o cromo. Nos processos mais modernos, o refino é realizado em outros equipamentos através do processo de refino secundário, no qual a diminuição da pressão parcial do CO para beneficiar a descarburização, é realizada por métodos a vácuo ou a gás. O método a vácuo é mais utilizado para fabricar aços com baixos teores de carbono, nitrogênio e hidrogênio, e o método a gás é mais indicado para garantir alta produtividade e baixo custo. Com a produção do aço líquido completa, ele é transformado em placas pelo lingotamento contínuo ou convencional;
- b) laminação: após o lingotamento as placas são reaquecidas até a temperatura de laminação. Nesta etapa o material é laminado até a espessura final, podendo passar ainda por um processo de laminação a frio para dar um acabamento final necessário.

c) recozimento, decapagem e operações de acabamento.

3.1.2 Processamento dos aços inoxidáveis ferríticos

O teor de cromo nos aços inoxidáveis ferríticos é maior que o encontrado nos aços inoxidáveis martensíticos, possuindo assim, resistência à corrosão maior que estes últimos, embora isso possa reduzir a resistência ao impacto do material (ACESITA, 2006).

A capacidade de estampagem (estampabilidade) dos aços inoxidáveis ferríticos é considerada boa, exceto em casos de estampagens extraprofunda. Estes aços são facilmente cunhados e trabalhados a frio (forjados, laminados e repuxados) (CÂNDIDO, 2003).

A tabela III. 3 exibe uma classificação dos tipos principais de aços inoxidáveis ferríticos em termos da estampabilidade, da soldabilidade e da resistência à corrosão, de acordo com uma classificação industrial (ACESITA, 2006).

Tabela III. 3 - Propriedades principais dos aços inoxidáveis ferríticos.

AISI	Acesita	Estampabilidade	Soldabilidade	Resistência a corrosão
409	P409A	....	....	....
430	P430A	...	..	..
-	P430E	....	...	...
-	P439A	....	....	...
-	P441A	....	....	...
-	P444A	...	....	....

Fonte: ACESITA, 2006, p. 8.

Os aços inoxidáveis ferríticos são muito utilizados em aplicações que necessitem de operações de embutimento e de estiramento. Nestas aplicações pode acontecer o aparecimento de estrias (fenômeno de “*ridging*” ou “*roping*”) durante a estampagem do produto (CÂNDIDO, 2003).

Este defeito é caracterizado pela presença de sulcos visíveis macroscopicamente na direção de laminação original da chapa e está relacionado com a anisotropia do material (heterogeneidade da textura cristalográfica), além do próprio processo minero-metalúrgico (CÂNDIDO, 2003). Neste último caso, pode ocorrer o acúmulo de elementos formadores de carbonetos que tendem a acumular a deformação, concentrando a mesma.

Para minimizar o problema, faz-se uso, por exemplo, da adição de nióbio para favorecer a formação de carbonetos de nióbio e assim, evitar a formação de outros tipos de carbonetos que possam dificultar a distribuição homogênea da deformação plástica, como utilizado para o aço inoxidável ferrítico AISI 430 do tipo 430E (a letra E indica que o aço foi estabilizado com uso de nióbio).

O aço AISI 430 é o tipo mais comum de aço inoxidável ferrítico, embora o uso deste material seja restrito quanto houver a necessidade de soldagem. As partes soldadas nestes materiais são frágeis e de menor resistência à corrosão (ACESITA, 2006).

Estes aços quando soldados apresentam a formação de martensita na região próxima ao cordão de solda, tornando essa região frágil. Além disso, observa-se ainda a precipitação de carbonitretos de cromo e o crescimento excessivo do tamanho do grão nas regiões soldadas (ACESITA, 2006).

Um dos procedimentos usados para melhorar a soldabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos é realizar o recozimento depois da soldagem ou então adicionar elementos de liga estabilizadores, como o titânio e o nióbio. Os estabilizadores devido à grande afinidade química que têm com o carbono formam carbonetos, reduzindo assim a formação de martensita e a precipitação de carbonitretos de cromo, além de barrar o crescimento de grão nas regiões especificadas. Entre os aços inoxidáveis ferríticos estabilizados, cita-se os aços AISI, 430, AISI 439, AISI 441, AISI 409 e o AISI 444 (ACESITA, 2006).

Os aços inoxidáveis ferríticos podem ser recozidos na faixa de temperatura de 760°C a 950°C. Algumas das propriedades físicas dos ferríticos estão representadas na tabela III. 4.

Tabela III .4 - Propriedades físicas dos aços inoxidáveis ferríticos.

AISI	Acesita	Densidade (g/cm ³)	Intervalo de Fusão (°C)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Módulo de Rigidez (GPa)
409	P409A	7,7	1483-1532	215	-
430	P430A	7,7	1483-1532	193	-
-	P430E	7,7	1427-1510	193	-
-	P439A	7,7	1427-1510	215	-
-	P441A	7,7	1427-1510	215	-
-	P444A	7,7	1427-1510	215	-

Fonte: ACESITA, 2006, p. 9.

Os aços inoxidáveis ferríticos estão desempenhando um papel cada vez mais importante em substituição aos aços austeníticos em diversas aplicações (tabela III. 5), devido à boa resistência à corrosão em meios líquidos, à boa resistência à oxidação em temperaturas altas e à boa resistência à corrosão sob tensão (CÂNDIDO, 2003).

Estes aços, quando recozidos e com uma granulação fina, apresentam boa ductilidade e conformação fácil (CÂNDIDO, 2003).

Tabela III. 5 - Principais aplicações dos aços inoxidáveis ferríticos

AISI	Acesita	Aplicações
409	P409A	Sistemas de exaustão de gases em motores de explosão e estampagem em geral, além de caixas de capacitores.
430	P430A	Utensílios domésticos (baixelas, pias e talheres), eletrodomésticos (fogões, geladeiras, fornos de microondas e lavadoras), cunhagem de moedas e balcões frigoríficos.
-	P430E	Utensílios domésticos (baixelas, pias e talheres), cunhagem de moedas, balcões frigoríficos, estampagem geral e profunda.
-	P439A	Usinas de açúcar e álcool, sistema de exaustão (tubos silenciosos), eletrodomésticos (máquinas de lavar roupas, fogões, fornos de microondas) e estampagem geral.
-	P441A	Sistema de exaustão (tubos), estampagem (corpo catalisador, silencioso, etc.).
-	P444A	Usinas de açúcar, caixas d'água, aquecedores residenciais de água e aplicações em indústria química e petroquímica.

Fonte: ACESITA, 2006, p. 10.

As limitações ao uso dos aços inoxidáveis ferríticos estão relacionadas à estampabilidade inferior, à susceptibilidade à fragilização, à formação de fissuras e à perda de ductilidade e tenacidade quando expostos à temperatura alta, o que limita aplicações que necessitem de soldagem (CÂNDIDO, 2003).

Os tipos de corrosão que atingem os aços inoxidáveis são: corrosão em ranhuras, “*pitting*”, intergranular e sob tensão (CÂNDIDO, 2003).

3.2 Conformação mecânica de chapas

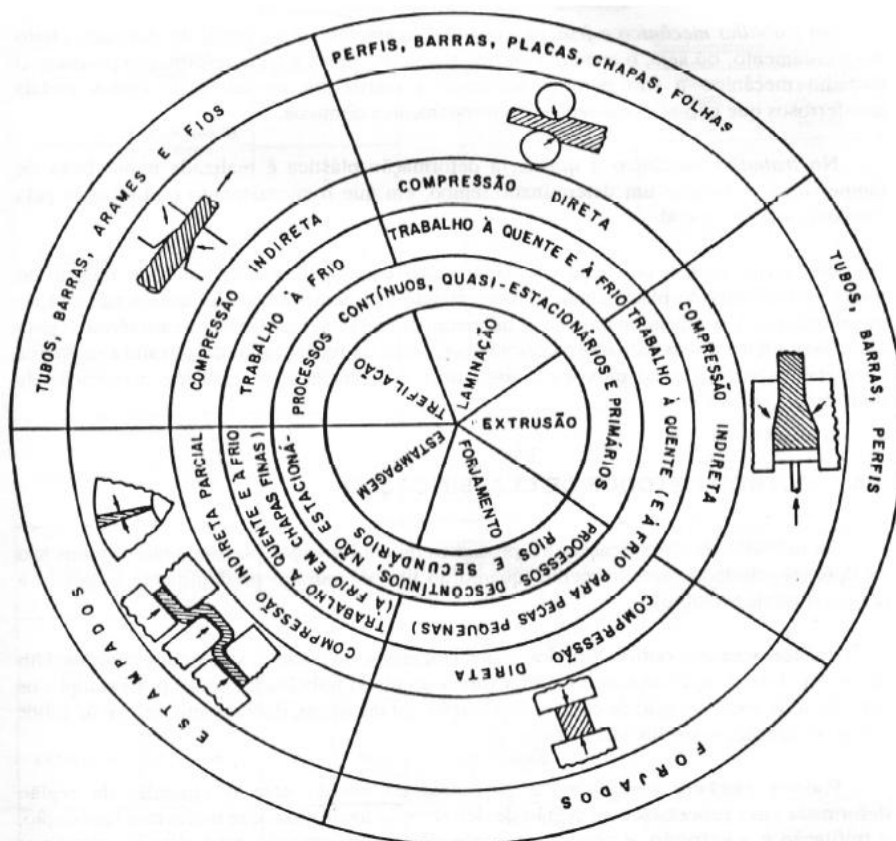
As diferentes técnicas de fabricação dos metais têm como princípio a transformação destes em produtos com o auxílio da aplicação de esforço mecânico, aquecimento e retirada

de material, quando necessário. Neste caso, destacam-se as operações de conformação mecânica, a fundição, a metalurgia do pó, a soldagem e a usinagem (CALLISTER, 2002).

Na conformação mecânica, uma peça metálica é produzida pela sua deformação plástica entre ferramentas, ou seja, a deformação é induzida por uma força externa, cuja magnitude excede o valor da tensão limite de escoamento do material. Quando a deformação é obtida em temperaturas acima da temperatura de recristalização do material, o processo é identificado como trabalho a quente, caso contrário, é classificado como trabalho a frio (CALLISTER, 2002).

As principais técnicas de conformação mecânica (figura 3.3) incluem a laminação, que consiste em deformar uma peça passando-a entre rolos (cilindros); o forjamento, cujo fundamento baseia-se na deformação de uma peça, normalmente quente, pela aplicação de esforço compressivo; a extrusão, em que uma barra é forçada a passar por entre um orifício em uma matriz; a trefilação, na qual uma barra (fio máquina) é alongada a partir da aplicação de um esforço de tração à saída de uma matriz (fieira) e a estampagem, que envolve uma série de operações para cortar, cunhar, dobrar, embutir e esticar chapas (CALLISTER, 2002).

Figura 3.3 - Esquema da classificação dos processos de conformação.



O conhecimento dos parâmetros básicos existentes na conformação mecânica é importante para a previsão da forma do produto final, para avaliar a susceptibilidade do material à formação de defeitos e para estimar as propriedades mecânicas do produto conformado (SCHAEFFER, 2004).

Os principais parâmetros de análise são: a distribuição de tensões e de deformações, a velocidade de deformação e a energia entregue ao material (SCHAEFFER, 2004).

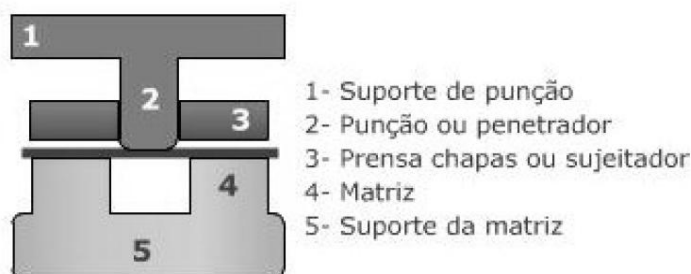
Dentre os processos de conformação destaca-se a estampagem de chapas pela versatilidade de forma dos produtos, a rapidez do processamento e a economia de material e de energia durante a conformação quando comparado com os processos tradicionais, como a laminação e o forjamento.

Na estampagem, a chapa é conformada à forma de uma matriz pela aplicação de esforços mecânicos com o auxílio de uma ferramenta (punção). Nota-se ainda o alongamento e a contração das dimensões de todos os elementos de volume durante esta operação (MORO e AURAS, 2011).

A maior parte da produção na conformação de chapas é realizada em prensas mecânicas ou hidráulicas, sendo o trabalho executado em uma ou várias operações progressivas (MORO e AURAS, 2011).

As ferramentas básicas (figura 3.4) utilizadas nas prensas são o punção e a matriz. O punção é uma ferramenta convexa, normalmente móvel, que se acopla a matriz côncava. Para evitar a formação de rugas na chapa a ser conformada são usados elementos de fixação para comprimir a chapa contra a matriz, elementos estes conhecidos como prensa-chapas (MORO e AURAS, 2011).

Figura 3.4 - Ferramentas básicas do processo de estampagem.



Fonte: MORO e AURAS, 2011, p. 30.

Para controlar a forma e o acabamento superficial da chapa estampada, algumas variáveis devem ser monitoradas, tais como: a folga e o atrito entre o punção e a matriz; as

forças envolvidas na operação; a geometria da matriz e do punção e a evolução estrutural e do encruamento ao longo da operação de estampagem mecânica (MORO e AURAS, 2011).

3.2.1 Corte

O processo de corte de chapas é uma das operações mais comuns nos processos de fabricação de componentes. Esta operação é usada para preparar o material para as próximas etapas de fabricação, retirar rebarbas após a estampagem ou constituir o próprio processo de acabamento.

Nesta operação, a separação de uma parte do material ocorre devido à aplicação de esforços cisalhantes aplicados por matrizes com arestas cortantes.

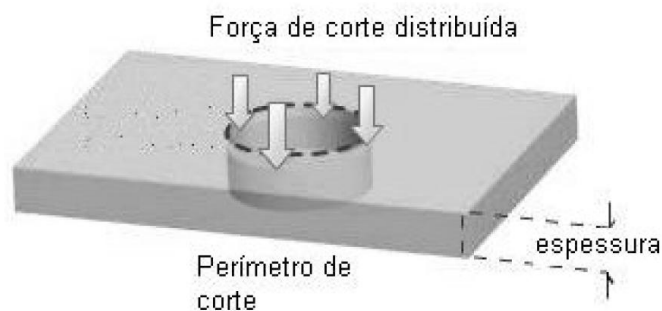
Com relação à qualidade da região cortada, verifica-se que o acabamento desta posição do material depende do acabamento/desgaste da aresta de corte, estabilidade/rigidez do equipamento e da distância entre o punção e a matriz (SCHAEFFER, 2004).

Se nenhum atributo específico for desejado para a superfície da chapa, a folga é selecionada em função da força mínima de corte. Contudo, a magnitude da folga considera ainda as tolerâncias da peça (MORO e AURAS, 2011).

As forças envolvidas no processo de corte são altas, principalmente para materiais com resistência mecânica elevada. Os fatores que alteram estas forças são: a folga entre o punção de corte e a matriz, o desgaste ferramental, a forma da linha de corte, a espessura da chapa, a qualidade da chapa e as condições de lubrificação (SCHAEFFER, 2004).

O valor da força de corte depende do tipo de material, da espessura da chapa e do perímetro de corte. A determinação da força de corte é calculada pela multiplicação da tensão de ruptura ao cisalhamento pela área a ser cisalhada. Neste caso, a tensão de ruptura ao cisalhamento apresenta valores entre 50 a 80 por cento da tensão de ruptura do material medida a partir de um ensaio de tração (SCHAEFFER, 2004). A figura 3.5 a seguir, mostra como é distribuída a força de corte em uma chapa.

Figura 3.5 - Exemplo de distribuição de força de corte em uma chapa.



Fonte: MORO e AURAS, 2011, p. 22.

A inclinação das arestas de corte, tanto para o punção como para a matriz, é utilizada para diminuir a força de corte. Quando a parte cortada é o produto final, a inclinação deve ser feita na matriz, caso contrário, a inclinação deve ser feita no próprio punção (MORO e AURAS, 2011).

As operações de corte podem ocorrer desde uma operação simples com um punção e uma matriz inferior até uma operação com uma estrutura complexa para assegurar maior precisão no corte (SCHAEFFER, 2004).

O funcionamento de uma prensa usada para o corte de chapas consiste basicamente na penetração na chapa pelo punção, sendo o esforço de compressão convertido em esforço cisalhante o que provoca a separação de uma porção da chapa. No processo, a chapa é deformada plasticamente até a ruptura nas superfícies em contato com o punção (MORO e AURAS, 2011).

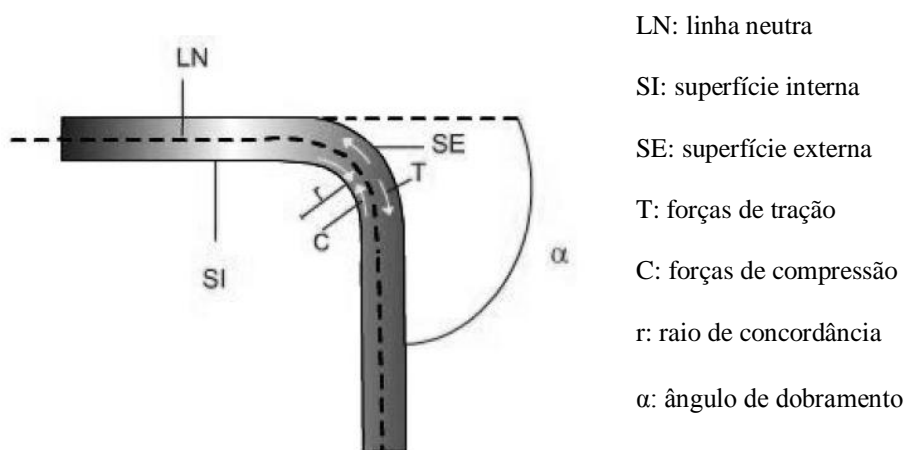
O processo de corte fino de chapas, que se caracteriza pelo emprego de folgas muito pequenas, com prensas e matrizes muito rígidas, produz chapas com superfícies de corte quase isentas de defeitos (MORO e AURAS, 2011). Esta operação é utilizada para obter peças planas, livres de rebarbas e com alto nível de tolerâncias. Alguns tipos de engrenagens são peças obtidas por este tipo de processo (SCHAEFFER, 2004).

3.2.2 Dobramento

O processo de dobramento é aplicado há muitos anos na indústria. Arames, barras, chapas e componentes maciços são exemplos de produtos que podem ser submetidos ao dobramento. Para executar esta operação é necessário considerar, dentre outros parâmetros, a forma do material que será dobrado, assim como a ductilidade e a própria resistência mecânica para reduzir erros na dimensão e na forma do produto dobrado.

Com relação à distribuição do esforço mecânico (figura 3.6) no dobramento, a chapa sofre deformação por flexão nas prensas. Neste caso, a chapa é submetida a esforços aplicados em direções diferentes para mudar a forma de uma superfície plana para concorrente, em ângulo, com raio de concordância em sua junção (MORO e AURAS, 2011).

Figura 3.6 - Esforços mecânicos atuantes no dobramento.

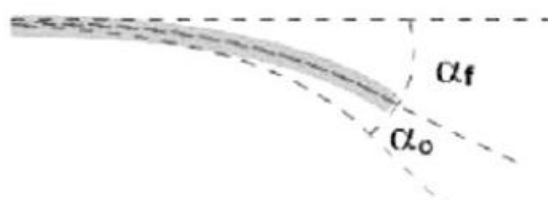


Fonte: MORO e AURAS, 2011, p. 25.

Com a aplicação do esforço mecânico, a superfície externa do material fica tracionada e a interna comprimida. Desta forma, uma parte das tensões atuantes na seção dobrada estará sob o regime elástico e a outra parte sob o regime plástico. Uma vez retirado o esforço de dobramento, a parte da seção do regime elástico tende a retornar à sua posição inicial, sendo este fenômeno conhecido pelo nome de “retorno elástico” ou “efeito mola”, como pode ser observado na figura 3.7. Desta forma, é necessário considerar a recuperação elástica do material para que a peça dobrada tenha as dimensões requeridas ao término da operação.

Figura 3.7 - Alteração do ângulo de dobramento devido ao retorno elástico.

α_o ângulo inicial, antes da liberação de carga
 α_f ângulo final



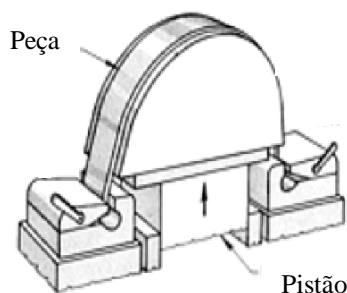
Fonte: MORO e AURAS, 2011, p. 27.

O retorno elástico está relacionado com a tensão limite de escoamento do material e com o processo de dobramento. Quanto menor o raio de dobramento, maior é a zona plástica, assim as forças elásticas e o retorno elástico são pequenos (SCHAEFFER, 2004).

3.2.3 Estiramento

O estiramento consiste na produção de peças a partir de chapas, barras e seções laminadas ou extrudadas, sobre um bloco ou uma matriz de formato estabelecido (normalmente com uma ponta arredondada), sendo o material submetido a um estado biaxial de tensão (tração), como mostrado na figura 3.8 abaixo.

Figura 3.8 - Processo de estiramento de uma chapa.



Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1301.

O estiramento é utilizado para produzir peças para a indústria aeroespacial de aço, de níquel, de alumínio, de ligas de titânio e de outros materiais resistentes ao calor, como materiais cerâmicos.

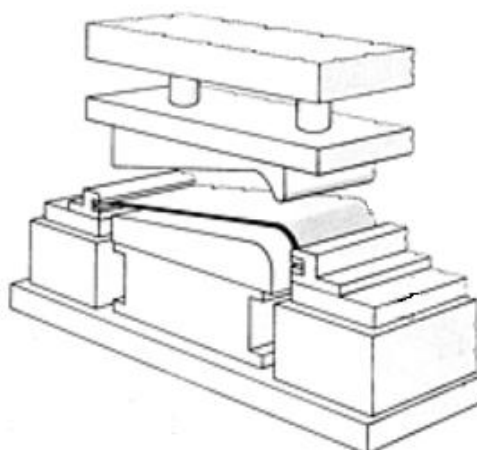
As vantagens do estiramento em relação à outras técnicas de conformação de chapas incluem: a força empregada é cerca de 70% menor do que no método convencional; a dureza da peça pode aumentar por deformação plástica (encruamento) e pode-se ainda fazer uso de equipamentos automáticos que podem ser adaptados para aumentar a produtividade deste método de fabricação (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Dentre as desvantagens desta operação de conformação cita-se o fato de a mesma ser pouco adequada para operações progressivas ou de transferência de material e a distribuição da deformação pelo material depende do acabamento superficial do punção usado para estirar a chapa, dentre outros aspectos (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Um dos métodos usados para o estiramento de uma chapa é o estiramento por embutimento que pode ser feito com uso de um punção na forma de bloco ou com uma matriz

simétrica. O estiramento por matriz simétrica (figura 3.9) utiliza uma matriz de duas partes (parte superior e inferior) montadas em uma prensa hidráulica, combinando as vantagens da conformação por estiramento e da estampagem de chapas convencional (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Figura 3.9 - Exemplo de estiramento em matriz simétrica.



Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1301.

Dentre as variáveis que influenciam o estiramento de uma chapa cita-se o tamanho e a configuração da peça que pode dificultar esta operação e conseqüentemente, a qualidade do produto estirado, assim como a magnitude da força usada para o estiramento e o tipo de lubrificante (ASM INTERNATIONAL, 1998). A força a ser aplicada ao material constitui o principal parâmetro operacional do estiramento.

A condição de lubrificação do material não é considerada uma variável essencial na operação de estiramento porque o movimento entre o metal e o bloco (ou matriz) é reduzido. Os lubrificantes são até evitados, pois podem atrair e reter partículas de poeira que danificariam a superfície da peça (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A força necessária ao estiramento pode ser estimada com uso da equação (3.3) (ASM INTERNATIONAL, 1998):

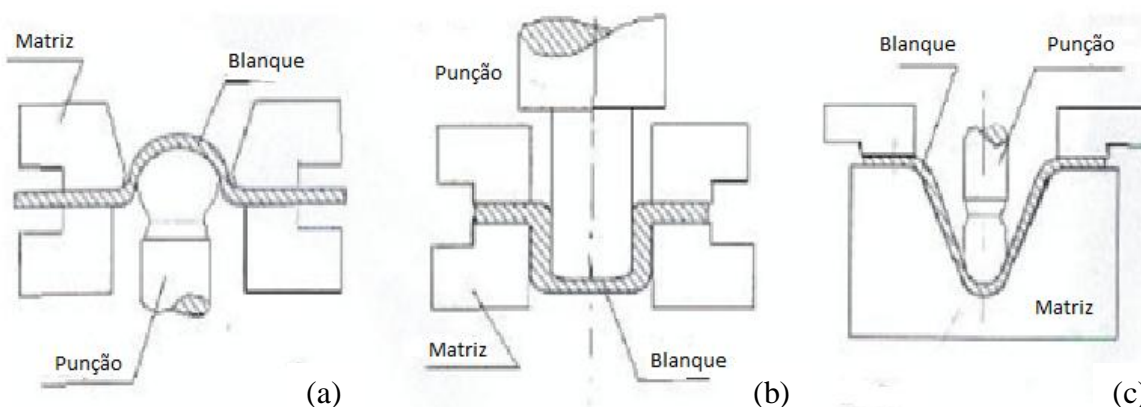
$$F = \left(\frac{1}{2}\right) \times (LE + LRT) \times A \quad (3.3)$$

onde F é a força a ser imposta, LE é o valor da tensão limite de escoamento do material, LRT é a tensão limite de resistência à tração e A é a área da seção transversal da peça. Para compensar o endurecimento da peça, o atrito e outras variáveis, o valor da força deve ser de aproximadamente 25% maior que o previsto para impedir a ocorrência de danos ao material ou ao equipamento (ASM INTERNATIONAL, 1998).

3.2.4 Estampabilidade

Estampabilidade é a capacidade que a chapa metálica tem de adquirir a forma de uma matriz, sem se romper ou apresentar qualquer defeito de superfície. A avaliação da estampabilidade de uma chapa pode ser verificada por vários tipos de ensaios: ensaios simulativos (tipo Erichsen, Olsen, Swift, Fukui), ensaios de tração, ensaios de dureza, medida da rugosidade do material e metalografia (MORO e AURAS, 2011). A figura 3.10 a seguir, representa os tipos de ensaios simulativos mais utilizados.

Figura 3.10 - Ensaios simulativos: (a) Ensaio Erichsen e Olsen, (b) Ensaio Swift e (c) Ensaio Fukui.



Fonte: FERREIRA, 2011, p. 3.

A estampabilidade é função tanto das propriedades do material, quanto das condições de deformação e dos estados de tensão e de deformação presentes (MORO e AURAS, 2011).

Para pequenos cilindros, a relação entre o diâmetro do blanque e o diâmetro do punção é utilizado para medir a estampabilidade de um material que será estampado, como por exemplo, embutido. A razão entre estes diâmetros é conhecido como o limite de estampabilidade (LDR). O teste mais usado em embutimento profundo é o ensaio Swift. O latão e o aço inoxidável austenítico apresentam altos valores de LDR (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Materiais policristalinos são constituídos de pequenos cristais, conhecidos como grãos, os quais são separados por delimitações chamadas de contornos de grão. As propriedades dos policristalinos dependem da forma, do tamanho e da orientação dos grãos, sendo que cada grão apresenta uma orientação cristalográfica diferente do outro. De uma maneira global, os grãos podem estar orientados de forma concentrada, ou seja, ao redor de alguma orientação

particular, assim pode-se dizer que o agregado policristalino apresenta uma orientação preferencial ou textura (CÂNDIDO, 2003).

Um material isotrópico possui as mesmas propriedades em todas as direções, já um material anisotrópico não, assim pode-se concluir que a anisotropia está relacionada com a textura cristalográfica. Um modo de avaliar o grau de anisotropia das chapas quando deformadas plasticamente é através do coeficiente de anisotropia.

O coeficiente de anisotropia é a razão entre a deformação longitudinal verdadeira na largura pela deformação longitudinal verdadeira na espessura de um corpo de prova de tração, após um valor de deformação inferior ao valor de deformação alcançado no ponto de instabilidade plástica em tração.

De acordo com a anisotropia no plano da chapa são definidos dois parâmetros: anisotropia normal média (indica a habilidade de a chapa metálica resistir ao afinamento quando submetida a uma operação de estampagem) e anisotropia planar (indica a diferença de comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa) (CÂNDIDO, 2003).

O valor da anisotropia planar relaciona ainda a susceptibilidade do material à formação de deformação irregular no flange da chapa estampada, fenômeno conhecido pelo nome de “orelhamento” (CÂNDIDO, 2003).

Na estampagem, pretende-se ter um pequeno afinamento da chapa para não comprometer as propriedades mecânicas da peça, assim a anisotropia normal média tem que apresentar um valor alto, e o valor da anisotropia planar deve ser pequeno para evitar o orelhamento (CÂNDIDO, 2003).

Como itens de controle da estampabilidade de um material, podem-se citadas as seguintes condições (ASM INTERNATIONAL, 1998):

- o material deve fluir facilmente na região do flange da peça;
- a capacidade da parede do material resistir à deformação em sua espessura.

Considerando esses dois fatores, as operações de estampagem devem maximizar o fluxo de material no plano da chapa e aumentar a resistência do fluxo de material na direção perpendicular ao plano da chapa (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A força de estampagem necessária ao fluxo do material na direção da espessura é de difícil medição, mas o coeficiente de anisotropia (R) compara as forças na direções do plano e da espessura, através dos valores de deformação verdadeira nestas direções, obtidos por testes de tração. Para deformações de metais em direções particulares, R é uma constante dada pela equação (3.4) (ASM INTERNATIONAL, 1998):

$$R = \epsilon_w / \epsilon_t \quad (3.4)$$

onde ϵ_w representa a deformação verdadeira na direção da largura e ϵ_t na direção da espessura.

Chapas metálicas são anisotrópicas, ou seja, as suas propriedades são diferentes em direções diferente. É necessário então a obtenção de uma média da relação da deformação, pela medição da deformação paralela, transversal e a 45° da direção de laminação da chapa. A expressão da anisotropia normal média (R_m) é dada pela equação (3.5) (ASM INTERNATIONAL, 1998):

$$R_m = (R_L + 2R_{45} + R_T) / 4 \quad (3.5)$$

onde R_L representa a relação de deformação na direção longitudinal, R_{45} a relação de deformação medida a 45° com a direção de laminação, e R_T a relação de deformação no sentido transversal.

Quando a força necessária ao fluxo do material é igual nas três direções (comprimento, largura e espessura), a anisotropia normal média será igual a um, porém quando a força é maior na direção da espessura que nas demais direções, apresentará valor maior que um. Neste último caso, o material resiste ao afinamento. Sendo que valores maiores da média, faz com que a profundidade de estampagem seja alcançada (ASM INTERNATIONAL, 1998).

As variações da relação de deformação em diferentes direções no plano da chapa é denominada anisotropia planar (ΔR), que é expressa pela equação (3.6):

$$\Delta R = (R_L + R_T - 2R_{45}) / 2 \quad (3.6)$$

Um material isotrópico teria $R_m = 1$ e $\Delta R = 0$. Estes parâmetros são medidas da anisotropia plástica das chapas (ASM INTERNATIONAL, 1998).

O orelhamento em embutimento profundo está relacionado a anisotropia planar. As diferenças de forças nas direções dos planos das chapas causam o orelhamento no produto estampado. Assim, na prática, uma maior quantidade de metal é utilizado na estampagem para que com a formação de orelhamento este defeito possa ser retirado sem afetar as propriedades do produto (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Diante do exposto, a estampabilidade pode ser expressa em função do limite de estampagem, equação (3.7), ou pelo percentual de redução do diâmetro do blanque, equação (3.8) (ASM INTERNATIONAL, 1998).

$$LDR = D / d \quad (3.7)$$

$$\% \text{ de redução} = [100(D - d)] / D \quad (3.8)$$

No processo de embutimento profundo, a pressão sobre a matriz aumenta proporcionalmente ao quadrado da espessura da chapa. Chapas grossas necessitam de pressão

menor pelas prensas-chapas que chapas finas, pois elas apresentam tendência menor de formar rugas (ASM INTERNATIONAL, 1998).

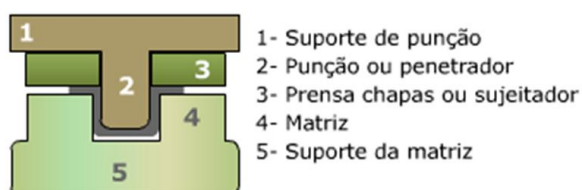
Chapas de aços e de outros metais com elevada capacidade de deformação plástica são comumente utilizadas em processos de embutimento profundo. Novos desenvolvimentos de estampagem têm auxiliado o aumento da prática de estampagem de aços. Alumínio e suas ligas, cobre e ligas, alguns aços inoxidáveis e titânio também representam materiais que podem ser submetidos a embutimento profundo (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Chapas de aços de baixo carbono são os materiais mais utilizados em procedimentos de embutimento, pois estes materiais são empregados na indústria automotiva. O tamanho de grão e o acabamento superficial destes materiais afetam a sua estampabilidade. Tamanho de grão maiores pode gerar excesso de rugosidade na superfície, e assim diminuir a estampabilidade (ASM INTERNATIONAL, 1998).

3.2.5 Embutimento profundo ou estampagem profunda

O processo de embutimento profundo ou de estampagem profunda consiste em transformar uma chapa metálica em diferentes formas geométricas com saliências profundas ou rasas. Os principais componentes (ferramentas) usados nesta operação de estampagem são: punção, prensa-chapas, matriz, extrator e base da matriz, como mostrado na figura 3.11 (SCHAEFFER, 2004).

Figura 3.11 - Embutimento profundo de um copo.



Fonte: MORO e AURAS, 2011, p. 30.

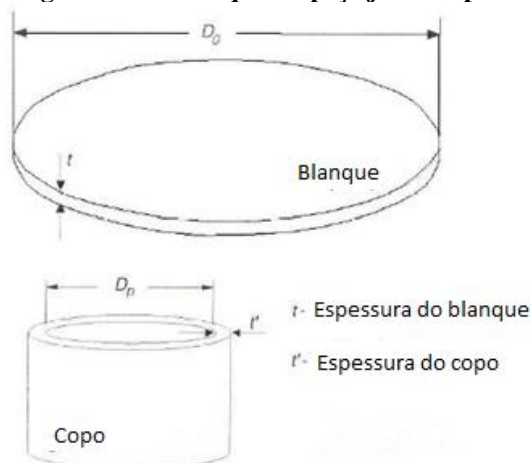
Qualquer metal pode ser transformado em chapa pelo processo de laminação e se for dúctil também pode ser submetido ao embutimento profundo. Os efeitos que a laminação a frio produz nas chapas devem ser removidos antes da estampagem e as bobinas não devem estar envelhecidas (tratamento térmico). Após o embutimento profundo, a ductilidade de uma chapa pode ser melhorada com a realização do tratamento de recozimento. Em muitos casos, o metal que foi submetido a uma primeira estampagem pode sofrer estampagens subsequentes sem a necessidade do recozimento entre as operações (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Contudo, algumas propriedades devem ser observadas no momento de escolher um material para a operação de embutimento ou estampagem profunda. Neste caso, cita-se que o material deve exibir (ASM INTERNATIONAL, 1998):

- composição química com quantidade reduzida de inclusões e de elementos residuais;
- propriedades mecânicas adequadas à necessidade de alongamento do material, sendo necessário assim, conhecer o valor do limite de deformação plástica até o início da instabilidade plástica em tração (alongamento uniforme) assim como o expoente de encruamento;
- propriedades físicas, dimensões, módulo de elasticidade e outros parâmetros capazes de manter (prevendo sempre, o retorno elástico do material após a aplicação do esforço mecânico) a forma após a estampagem.

O início do processo de conformação por estampagem é feito a partir do dimensionamento de um blanque (esboço) recortado de uma geratriz (chapa), com a forma adequada de modo a reduzir a perda de material durante o processo de estampagem. A figura 3.12 mostra um blanque e um copo produzido a partir do mesmo.

Figura 3.12 - Blanque e a peça já estampada.

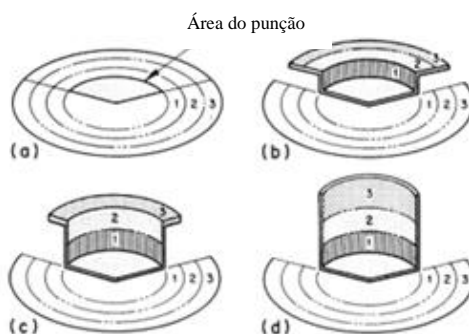


Fonte: FERREIRA, 2011, p. 7.

A transformação de uma geratriz em um corpo estampado deve considerar o valor do limite de estampabilidade, definido pela razão do diâmetro do blanque pelo diâmetro do punção. O valor do limite de estampabilidade auxilia na determinação do número de etapas necessárias à produção de um objeto. Neste caso, se o formato e as dimensões da peça exigir, a estampagem pode ser executada em mais de uma etapa, sendo o limite de deformação definido em termos do valor do limite de estampabilidade do material (SCHAEFFER, 2004).

O esboço (blanque) do metal é transformado em uma peça pela pressão de um punção sobre a sua porção central que está sobre uma matriz. Os estágios do fluxo de metal durante o embutimento profundo de uma peça estão representados na figura a seguir (figura 3.13). Durante o primeiro estágio, a parte mais interna do blanque, que está abaixo do punção, entra em contato com o punção sofrendo operações de dobramento e formando assim o fundo da peça. Simultaneamente e em sequência, as partes externas do blanque movem em direção ao centro e entram em contato com a lateral do punção sendo forçados a dobrarem e enrolarem em torno do punção. Este procedimento ocorre até a formação da peça. O fluxo de metal ocorre até que todo o metal tenha sido estampado, ou até um ponto no qual a região de flange é mantida (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Figura 3.13 - Representação do fluxo metálico no processo de embutimento profundo.



Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1265

Neste processo de estampagem, a deformação acontece na região de flange e sobre a extremidade/ponta da matriz, não sendo observada a deformação na região da borda/canto do punção. O embutimento profundo é considerado como sendo uma operação similar à trefilação, pois em ambos os processos uma seção transversal larga é transformada em uma seção transversal menor com comprimento maior (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A espessura do metal não muda muito com o embutimento profundo, por isso, a área superficial também se conserva. Como o metal na área de flange é estampado em matriz aberta, ele é sujeito a tensões de estiramento radial e à compressão circunferencial. Isso faz com que um blanque de 127mm de diâmetro com uma área superficial de 126cm² possa formar uma peça de 64mm de profundidade com uma superfície total de cerca de 121cm² (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A operação de embutimento profundo de chapas metálicas é utilizada para obter diferentes produtos por um processo no qual o centro da chapa é pressionada para dentro de uma matriz aberta com objetivo de adquirir o formato da mesma sem que ocorra dobras nos

cantos da chapa. O procedimento requer a utilização de prensas que desempenham a função de manter a força e empurrar o punção.

O embutimento profundo possibilita a fabricação de diversos produtos com formas circulares, como painelas, caixas ou containers, além de pára-lamas, portas de carros, dentre outros.

A estampagem envolve uma contínua intervenção entre o material e as ferramentas usadas para a estampagem deste. Assim, os parâmetros do processo de estampagem devem ser conhecidos e controlados para garantir a qualidade do produto estampado (SCHAEFFER, 2004).

A lubrificação é importante na operação de embutimento profundo, pois melhora o rendimento do processo. Desta forma, os esforços de conformação e o desgaste do ferramental são reduzidos. Destaca-se ainda o fato de que, quanto maior a eficácia de um lubrificante, mais difícil será a retirada do mesmo, sendo a limpeza integral das peças estampadas função do tipo de lubrificante utilizado na operação de conformação mecânica. (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A escolha do lubrificante é baseada na capacidade de prevenir rugas, arranhões e até mesmo fratura durante o procedimento. Considera-se ainda a facilidade de aplicação, de remoção do mesmo, da proteção contra a corrosão, dentre outros fatores. (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Lubrificantes que contém compostos de chumbo ou de zinco não são utilizados para a estampagem de aço inoxidável ou ligas resistente ao calor, pois estes compostos podem causar ataque intergranular em elevadas temperaturas, se não forem completamente removidos (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Alguns metais (magnésio e titânio) são estampados em temperaturas elevadas, assim a seleção do lubrificante é mais rigorosa. Lubrificantes a base de óleo e a base de sabão são empregados em temperaturas em torno de 120°C, acima desta temperatura, a escolha é mais rígida. Dissulfeto de molibdênio e grafite são exemplos de lubrificantes que podem ser aplicados em altas temperaturas (ASM INTERNATIONAL, 1998).

O custo de aplicação e remoção do lubrificante, assim como seu custo inicial, deve ser considerado, pois influencia diretamente no custo da peça produzida. Mudanças nas técnicas de estampagem ou nos projetos das peças podem ser realizados para adequar ao lubrificante empregado (ASM INTERNATIONAL, 1998).

3.2.5.1 Variáveis do processo

As principais variáveis do processo de embutimento profundo são o raios do punção e da matriz, a folga entre o punção e a matriz, a velocidade da prensa, a lubrificação e o tipo de restrição do fluxo de metal (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Quando o blanque é atingido pelo punção na estampagem, ele é enrolado em torno do punção e da matriz. A curvatura formada tem o raio do punção e a quina (borda) da matriz (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A força total para realizar a estampagem é composta da força ideal necessária para transformar um blanque em um produto estampado, da força de atrito entre a matriz e o prensa-chapas, da força de atrito na passagem da chapa pela matriz e da força necessária para equilibrar o retorno elástico do material (SCHAEFFER, 2004). Esta força pode ser dividida nos seguintes termos (ASM INTERNATIONAL, 1998):

- a) da força para dobrar e desdobrar o fluxo de metal da região de flange para a lateral;
- b) da força para superar a resistência ao atrito da passagem do metal;
- c) da força para realizar a compressão circunferencial e o alongamento radial do metal na região de flange.

A força do punção durante a estampagem aumenta rapidamente, até atingir um máximo e diminui gradualmente para zero na região de flange e entre a matriz e a parede da concha. Devido o diâmetro da peça permanecer constante, a carga máxima da prensa e o comprimento do curso do punção exigida pela estampagem da peça depende do tamanho do blanque (ASM INTERNATIONAL, 1998).

O equilíbrio entre a força do punção, a força de fixação, e a força da chapa permite uma estampagem correta. No início do processo, o metal presente na área livre entre o fundo do punção e a região de flange é esticado e enrolado ao redor do punção. Durante este alongamento, ocorre o encruamento do metal que o fortalece. Se o material não é capaz de alongar ou se a força que atua sobre ele for muito elevada, o fundo da peça irá fraturar. Se o metal apresentar resistência ao afinamento elevada, as tensões radiais e circunferenciais na região de flange serão maiores para acomodar o processo de embutimento profundo (ASM INTERNATIONAL, 1998).

As tensões presentes na lateral do metal que está sendo estampado são de compressão e de tração (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Os raios do punção e da matriz e a percentagem de redução determinam a carga que atua no fundo do copo. O aumento do raio do punção e da matriz garantem uma melhor

estampabilidade, sendo que o aumento do raio da matriz faz com que a força do punção necessária a estampagem seja diminuída (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Se o raio da ponta do punção for aumentado de 1 a 5 vezes o valor da espessura da chapa, a carga na parede lateral do copo diminuirá a fim de que a redução do diâmetro do blanque aumente de 35% para 50%, em casos de estampagem com aços. Assim o copo pode adquirir profundidades maiores antes que a parede lateral rompa (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Em casos onde o raio do fundo do copo é quatro vezes menor do que a espessura da chapa, para minimizar falhas no fundo, realiza-se estampagem com um punção de raio maior (ASM INTERNATIONAL, 1998).

O embutimento profundo de aços inoxidáveis pode gerar um problema de estabilidade dimensional (abaulamento da superfície), que representa a deflexão dos lados (com quebra) do material estampado. Assim para evitar este defeito emprega-se a estampagem em duas operações, com a utilização de diferentes punções e com a realização do tratamento de recozimento da peça entre as operações. O primeiro punção terá um raio maior do que o segundo, assim a segunda operação será responsável por esticar o metal até a eliminação do abaulamento do material (oil-canning) (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A folga entre o punção e a matriz vai depender dos requisitos da peça a ser estampada e do tipo de metal empregado. Ela ajuda a evitar o contato direto da matriz com o punção e com isso, a mudança da condição de atrito durante a operação de estampagem da peça, de modo a evitar, dentre outros efeitos, a perfuração do fundo do peça (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A força de estampagem é mínima quando a folga é aproximadamente 15 a 20% maior que a espessura do material e as partes côncavas da peça não estão em contato com o punção e a matriz. Esta força aumenta à medida que a folga diminui e um pico secundário ocorre na curva de aplicação do esforço mecânico durante a estampagem (golpe) onde a espessura do metal é um pouco maior do que a folga e onde se observa o início da redução da espessura da chapa (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A folga entre o punção e a matriz para uma peça com seção transversal retangular é quase a mesma que a necessária para a conformação de uma peça com seção transversal circular. As folgas na proximidade dos raios do punção e da matriz podem ser até 50% maior que a espessura da chapa para evitar o afinamento destas áreas e aumentar a estampabilidade (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A folga entre o punção e a matriz deve ser controlada para evitar o enrugamento dos cantos da chapa (figura 3.14) e possibilitar o escoamento do material para o interior da matriz, impedindo assim, a ocorrência de tensões cisalhantes que possam levar à ruptura do metal durante a estampagem (MORO e AURAS, 2011). Se o enrugamento ocorrer, será necessário operações posteriores a estampagem para que o produto tenha o formato final adequado (ASM INTERNATIONAL, 1998 e MORO e AURAS, 2011).

Figura 3.14 - Exemplo de enrugamento formado na estampagem de uma chapa.



Fonte: Produzido pela Autora

Ainda com relação à folga entre o punção e a matriz verifica-se que, após a formação do fundo de uma peça embutida, esta distância permite que o metal da lateral da peça esteja livre para mover sem fricção excessiva com as paredes da matriz. Uma pequena rugosidade e uma quantidade mínima de lubrificante no punção contribue para o procedimento, contudo, a matriz aberta deve ser muito bem lubrificada e lisa (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A espessura da chapa e o raio da matriz são restrições ao fluxo de metal para a matriz na estampagem. A utilização de prensa-chapas garante que uma restrição adicional ao fluxo irá ocorrer, e isto faz com que o fluxo possa ser controlado melhor. Além do prensa-chapas controlar o fluxo de metal, ele evita a formação de rugas e de dobras, e possibilita maiores reduções do material a ser estampado. Se a razão entre o comprimento e a espessura da chapa estiver dentro dos limites de estampabilidade calculados por procedimentos ou normas específicas, não será necessária a utilização de um prensa-chapas no procedimento. A relação do comprimento pela espessura não é muito influenciada pelas diferentes condições geométricas e pelos diferentes tipos de metais estampados (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A distância entre a matriz de entrada ou superior e o punção não deve exceder dez vezes a espessura da chapa (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Os prensas-chapas são empregados tanto em prensas de ação simples, como em prensas de ação dupla. Eles devem permitir que o metal que sofreu acréscimo da espessura na

borda da chapa se movimente em direção à borda da matriz de trabalho. O acréscimo da espessura pode ser calculado pela equação (3.9) (ASM INTERNATIONAL, 1998):

$$\frac{t_1}{t} = \sqrt{\frac{D}{D_1}} \quad (3.9)$$

onde t é a espessura do blanque, t_1 é a espessura na região do flange do copo estampado, D é o diâmetro do blanque, e D_1 é o diâmetro até a borda da chapa estampada (até o flange). O valor real de t_1 é menor do que o calculado pela fórmula (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A força necessária ao prensa-chapa é cerca de um terço da força de estampagem. A espessura da chapa, em operações de estampagem simples, também deve ser considerada, pois espessuras menores requerem que a força do prensa-chapa seja maior (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Não existe um modo geral para o cálculo da força dos prensa-chapas, geralmente estes valores são determinados empiricamente e dependem da redução da estampagem, das propriedades e da espessura do metal, do tipo de lubrificação e outros (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A velocidade da estampagem é fornecida em metros por minuto (m / min) ou em pé por minuto (ft / min). As condições ideais de estampagem incluem: uso de um metal com boa estampabilidade, emprego de lubrificação adequada, de pressões controladas, dentre outros. Quando alguma das condições é inferior a ideal, uma redução na velocidade de estampagem é necessária. A velocidade do punção em prensas hidráulicas é relativamente constante ao longo do deslocamento do punção, já em prensas mecânicas, a velocidade é constante até a metade do deslocamento do punção (ASM INTERNATIONAL, 1998).

O controle da velocidade é mais importante na estampagem de aços inoxidáveis e de ligas resistentes ao calor do que na estampagem de metais dúcteis. Velocidades muito elevadas causam rachaduras e redução excessiva das paredes na estampagem dos metais menos dúcteis. A faixa de velocidade para os aços inoxidáveis é de 9,2 – 12,2 m/min, já para o alumínio é de 45,7 – 53,3 m/min (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Quando metais em contato estão em movimento sob pressão, riscos podem surgir nas ferramentas e na chapa metálica. Se estes riscos tornam-se grandes, a força de estampagem aumenta e sua distribuição não é mais homogênea, o que pode levar a fratura da peça produzida. A probabilidade de o metal se unir à matriz depende da força empregada e da composição do metal (ASM INTERNATIONAL, 1998).

No embutimento profundo, o material deve apresentar ductilidade suficiente para obter a forma requerida do produto, sendo necessário assim, encruamento suficiente para evitar a formação precoce de um ponto de estrição na chapa.

Assim, o valor do coeficiente de encruamento (que avalia a capacidade de o material endurecer por deformação plástica e assim, resistir ao afinamento localizado) não pode ser reduzido durante a estampagem do material, embora essa condição seja praticamente impossível de se observar porque o material é exposto à combinação de diversos modos de deformação.

Para uma condição ótima de estampagem destaca-se ainda que o valor da anisotropia normal média, deve ser próximo a 1 (condição ideal igual a 1), situação que indica anisotropia reduzida do material e maior capacidade de deformar para obter a forma da matriz de estampagem. Como exemplo, a tabela III. 6 apresenta valores de anisotropia normal média de alguns aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, além do aço SAE (*Society of Automotive Engineers*) 1020, (CÂNDIDO, 2003).

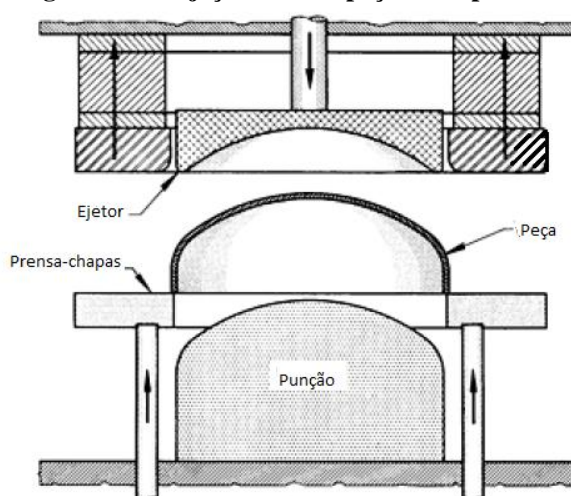
Tabela III. 6 - Valores típicos dos coeficientes de anisotropia e da anisotropia normal média.

Liga	R_0	R_{45}	R_{90}	R_m
AISI 306	0,9	1,1	0,9	1,0
AISI 304	0,9	1,0	0,9	1,0
AISI 301	1,0	0,9	0,8	0,9
AISI 300	1,0	0,9	0,8	0,9
AISI 201	1,0	1,0	0,9	1,0
AISI 430	0,9	0,6	1,5	0,9
AISI 409	1,0	1,0	1,5	1,1
AISI 400	1,0	1,0	1,5	1,1
SAE 1020	2,1	1,5	2,4	1,9

Fonte: CÂNDIDO, 2003, p. 63.

A ejeção das peças estampadas (figura 3.15) é de extrema importância, pois as peças podem aderir tanto ao punção quanto a matriz se não forem retiradas rapidamente. Esta adesão é aumentada de acordo com a profundidade da estampagem, com o agarramento das paredes da peça, e com a viscosidade do lubrificante. Para peças pequenas a ejeção é realizada pela injeção de ar comprimido no punção ou na matriz, já no caso de peças grandes ou muito profundas alguns métodos mecânicos são aplicados, como a combinação de um prensa-chapas com um ejetor (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Figura 3.15 - Ejeção de uma peça estampada.



Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1296.

Na maioria das operações de embutimento profundo forma-se defeitos na região do flange (borda da peça) da peça, que são cortados no final do processo. Em alguns casos, a forma do produto é adquirida sem a utilização do punção. Para controlar a área do flange e para evitar a formação de rugas, uma força de fixação é aplicada ao blanque (geratriz) para mantê-lo em contato com a superfície superior da matriz. As prensas podem ter acionamento hidráulico ou mecânico, porém as hidráulicas são as preferidas devido ao melhor controle da taxa de deslocamento do punção (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Defeitos nos produtos estampados podem ocorrer por diversos fatores. Dentre estes defeitos destaca-se o abaulamento, a formação de rugas e a ocorrência de fraturas no sentido transversal da chapa, dentre outros (SCHAEFFER, 2004).

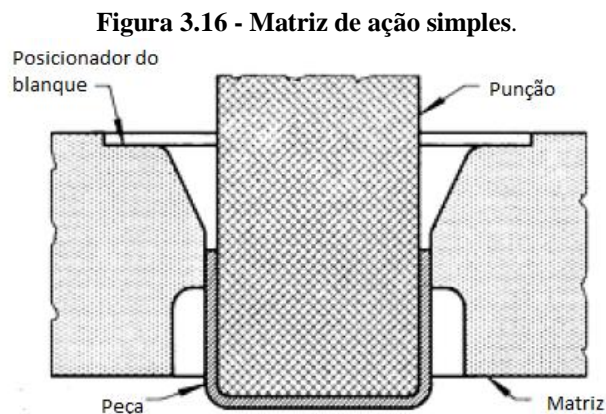
A formação de rugas, por exemplo, é reduzida pela imposição do esforço de compressão pelo prensa-chapas. Essa compressão equilibra a tensão compressiva circunferencial criada pelo punção ao impulsionar o material contra a cavidade da matriz de estampagem (SCHAEFFER, 2004).

3.2.5.2 Ferramentas utilizadas

Prensas hidráulicas ou mecânicas representam os tipos de prensas utilizadas na estampagem de chapas metálicas. Para a escolha adequada do tipo de prensa a ser empregada, fatores como a força necessária à estampagem, a cavidade da matriz e o deslocamento do punção devem ser levados em consideração. Além do que a condição dos mancais (mancal do eixo de manivelas) e chavetas também influenciam na seleção da prensa (ASM INTERNATIONAL, 1998).

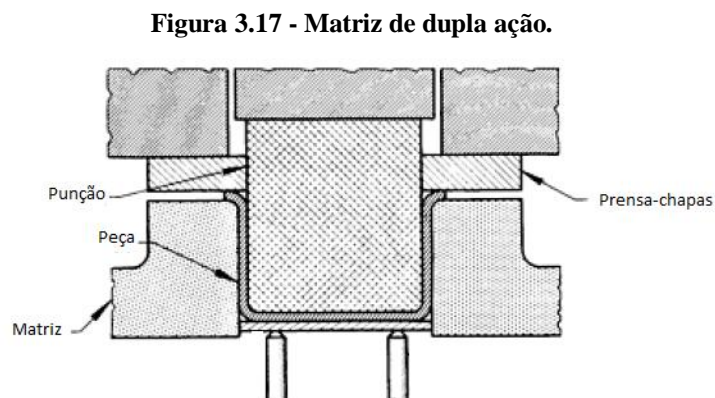
As matrizes utilizadas na estampagem podem ser (ASM INTERNATIONAL, 1998):

- de ação simples: são as mais simples, e contêm apenas um punção e uma matriz. São utilizadas quando o limite de conformação permite a obtenção de um copo sem a utilização de prensa-chapas; como mostrado na figura 3.16;



Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1271.

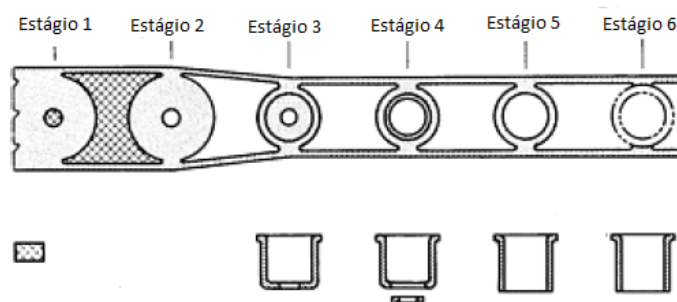
- de dupla ação: utiliza prensa-chapas, permite maiores reduções e a estampagem das partes flangeadas (abas); como mostrado na figura 3.17;



Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1271.

- compostas: são as mais utilizadas quando o custo é justificado por exigências de produção, sendo que a preparação do material para a estampagem (corte) é uma operação realizada nestas matrizes. As peças são produzidas mais rapidamente do que em matrizes de ação simples;
- progressivas: devido ao custo inicial e ao comprimento do curso do punção, estas matrizes são limitadas a produções de pequenas peças; um exemplo deste tipo de matriz é apresentado na figura 3.18;

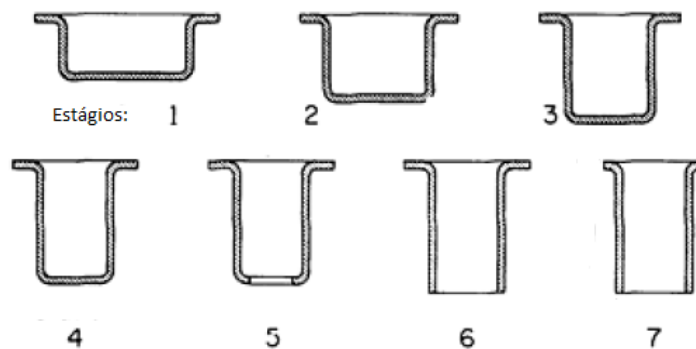
Figura 3.18 - Matriz progressiva.



Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1272.

- múltiplas com mecanismos de transferência: estas prensas, em conjunto com mecanismos de transferência são usadas para a produção em massa de peças grandes ou na produção de peças de variados tamanhos. Apresenta maior flexibilidade do que as matrizes progressivas, pois nas matrizes múltiplas (figura 3.19) a peça não fica presa à armação da máquina durante a formação. A taxa de produção é maior do que em matriz simples, porém de 10 a 25% menor do que em matriz progressiva.

Figura 3.19 - Matriz múltipla com mecanismo de transferência.



Sequências de operações: 1 - Copo. 2 - Reestampagem. 3 - Reestampagem. 4 - Reestampagem. 5 - Perfurar o fundo. 6 - Retirar o fundo. 7 - Aparar região de flange

Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1273.

Os materiais utilizados para a fabricação das ferramentas usadas para a estampagem incluem aços ferramenta, aços tratados termicamente por têmpera, ferros fundidos e bronzes especiais. Deve-se considerar ainda que para cada tipo de material faz-se a escolha específica do lubrificante a ser usado na estampagem (SCHAEFFER, 2004).

A escolha do tipo de matriz depende do tamanho da peça a ser produzida, das tolerâncias, do tipo de material e da produtividade requerida para a fabricação de um produto específico (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Muitas peças podem ser produzidas por todos esses métodos. Assim, o custo da ferramenta, a taxa de produção, e a quantidade total de peças a serem estampadas que determinam qual o tipo de matriz mais adequado (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A seleção de material para as matrizes e punções dependem da composição do metal em serviço, do tamanho da peça a ser produzida, do rigor da estampagem, da quantidade de peças a serem estampadas, e das tolerâncias e superfície específicas das peças estampadas. Deste modo, para atender todos estes requisitos, existem matrizes e punções de poliésteres, epóxis, fenólicos, resinas de nylon, aços ferramentas e metal duro (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Prensa-chapas são utilizados para evitar a formação de rugas devido a força de compressão que provocam na região de flange. As rugas surgem devido a falta de uniformidade no movimento ou devido a resitência do movimento na seção transversal do metal. Uma força de fixação, alcançada com o prensa-chapa, resiste ou compensa o movimento não uniforme, evitando assim a formação de rugas. Uma vez que uma ruga começa, outras formam facilmente, pois elas afastam o prensa-chapa da superfície do metal. A força necessária aos prensas-chapas para manter o blanque durante a estampagem varia de praticamente zero, até valores referentes a um terço da carga de estampagem, quando blanque de espessura menores são utilizados. Assim para blanque mais finos, maiores forças de fixação será necessária (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Estampagem sem prensa-chapas depende da razão entre o comprimento do blanque pela sua espessura, da redução do diâmetro do blanque para o diâmetro da peça, e a razão do diâmetro do blanque pela espessura do mesmo. Para chapas grossas, a redução máxima do diâmetro sem a presença de prensa-chapas é cerca de 25%. Se um prensa-chapas é empregado, a redução máxima é aumentada para cerca de 50% para os metais de excelente estampabilidade e 25 a 30% para metais com capacidade de estampagem menor (ASM INTERNATIONAL, 1998).

3.2.5.3 Tipos específicos de embutimento

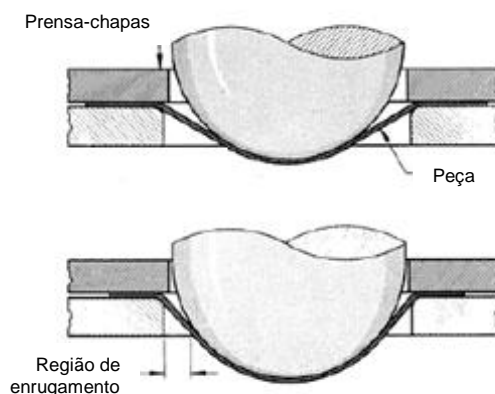
A produção de peças estampadas com bordas (flanges) nem sempre gera algum tipo de problema, e elas podem ser produzidas em peças estampadas cilíndricas, retangulares ou mesmo assimétricas. As peças com flanges geralmente são estampadas em mais de uma etapa, exigindo outra etapa de compressão como operação final (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A criação de peças cilíndricas com amplas regiões de flanges por estampagem é dificultada devido ao excesso de enrugamento ou até mesmo da ocorrência de fratura lateral na peça pela falta de fluxo metálico. Mesmo com a utilização de um prensa-chapas, a planicidade da região de flange não é obtida sem procedimentos especializados (ASM INTERNATIONAL, 1998).

O fluxo de metal na estampagem de um material com formato esférico (figura 3.20) é muito bem controlado para se alcançar um equilíbrio entre o afinamento excessivo em uma área e o enrugamento em outra. O afinamento na seção esférica ocorre devido a formação de um estado de tensão biaxial na medida que o punção avança sobre o blanche. Com a aplicação de uma pressão ideal do prensa-chapas, o afinamento fica na faixa de 10 a 15%, mais do que isto pode levar a fratura da região. Já o enrugamento acontece, pois com o avanço do punção, o metal que estava preso pelo prensa-chapa começa a se mover para entre a matriz e o punção e fica em uma região livre de tensões, o que causa o enrugamento nesta área (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Para evitar as rugas é necessário que o metal seja mantido sobre tensão ao mesmo tempo em que ele flui da região dos flanges, ou seja, uma força adicional terá que ser realizada, proveniente da porção de material do blanche .que ainda encontra-se preso pelo prensa-chapas. Uma outra forma de controlar a formação de rugas é com o emprego de freios (*draw beads*) (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Figura 3.20 - Estampagem de uma peça com formato esférico.



Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1998, p. 1289.

A redução da seção é usada para reduzir o diâmetro de uma peça em função de sua espessura e altura. Com a redução da matriz, o metal é comprimido, o que resulta em um aumento no comprimento e na espessura da parede (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Ironing é a redução da espessura da parede de uma chapa pelo aprisionamento do metal entre o punção e a parede da matriz. O *ironing* faz com que a força necessária para deslocar o punção aumente até um valor máximo na curva que monitora a força necessária à estampagem em função do deslocamento do punção. A força máxima secundária pode ser tão elevada que cause a fratura da chapa. No entanto, após o início do *ironing*, o metal envolve-se em torno do punção, e a força torna-se uniforme e menor do que as utilizadas para as operações de reestampagem (ASM INTERNATIONAL, 1998).

A operação de estampagem para a produção de seções circulares com espessura reduzida, *ironing*, raramente é empregada com uma operação de reestampagem, ao menos que a quantidade de afinamento da parede seja relativamente pequena. O procedimento de *ironing* resulta em um desgaste excessivo da matriz, pode provocar a ruptura da peça, além de aumentar os requisitos da produção em série de peças. Se uma peça com espessura de parede constante é necessária, esta pode ser obtida por *ironing* (ASM INTERNATIONAL, 1998).

3.3 Técnicas de caracterização

Muitos testes são realizados para caracterizar a estampabilidade das chapas. Dentre eles citam-se os testes de tração uniaxial que fornecem as propriedades mecânicas e identifica a anisotropia dos materiais mediante a construção da curva de fluxo (tensão convencional versus deformação convencional) e cálculo dos fatores de anisotropia medidos a 0°, a 45° e a

90° em relação à direção de laminação original da chapa, as curvas limite de conformação que identificam o limite de deformação com as direções principais de deformação e os testes para a determinação do coeficiente de atrito (teste do anel, por exemplo) (SCHAEFFER, 2004).

Outras técnicas de caracterização, como os ensaio de cisalhamento de chapas, a microscopia óptica e de varredura de feixe de elétrons e a difração de raios-X, por exemplo, também são utilizadas para avaliar características específicas do material, como a transformação de fases, assim como o limite de deformação e a variação do encruamento durante a conformação do material.

3.3.1 Caracterização microestrutural

É necessário examinar as características estruturais e os defeitos presentes nos materiais que serão e ou que já foram estampados.

No caso da microscopia óptica, as imagens produzidas resultam da diferença na refletividade das diversas regiões da microestrutura após a preparação metalográfica da amostra, envolvendo neste caso, etapas de corte da peça (com refrigeração), o embutimento (acomodação da amostra cortada em um polímero), o lixamento mecânico em uma sequência de lixas específica, o polimento em panos embebidos com lubrificante adequado (alumina e pasta de diamante são os mais comuns), o ataque com uso de um reativo químico adequado à composição química do material de estudo, a observação da estrutura (microestrutura) do material mediante o uso de um microscópio óptico (figura 3.21) e o registro das imagens (fotomicrografias).

Figura 3.21 - Microscópio óptico BX-51 da Olympus.



Fonte: USP, 2011.

O microscópio eletrônico é utilizado para casos em que se necessita do registro de imagens com ampliação maior para o estudo de uma característica particular do material, como a presença de heterogeneidades específicas. Neste caso, citam-se as técnicas de microscopia de varredura por feixe de elétrons (MEV) e de transmissão (MET).

A primeira técnica é a mais comum pelo fato da preparação da amostra para a análise ser similar à utilizada para a observação por microscopia óptica, enquanto a microscopia eletrônica de transmissão exige a obtenção de uma superfície delgada (material com espessura na faixa do micrometro).

Na microscopia de varredura por feixe de elétrons (MEV), a imagem da estrutura é formada pela interação do material com o feixe de elétrons produzido por um filamento de tungstênio submetido à ação de uma diferença de potencial elétrico elevado (tipicamente entre 5kV e 30kV) (CALLISTER, 2002).

As imagens geradas pela microscopia de varredura por feixe de elétrons são da superfície das amostras. Desta forma, esta região do material deve ser condutora de eletricidade, mesmo que o material não seja necessariamente, condutor elétrico. Neste caso, faz-se uso de uma preparação específica (metalização) com a aplicação de uma camada reduzida de ouro (mais comum) por alguns processos, dentre os quais o *sputtering* (nuvem de elétrons), figura 3.22.

Figura 3.22 - Metalizadora Quick Coater

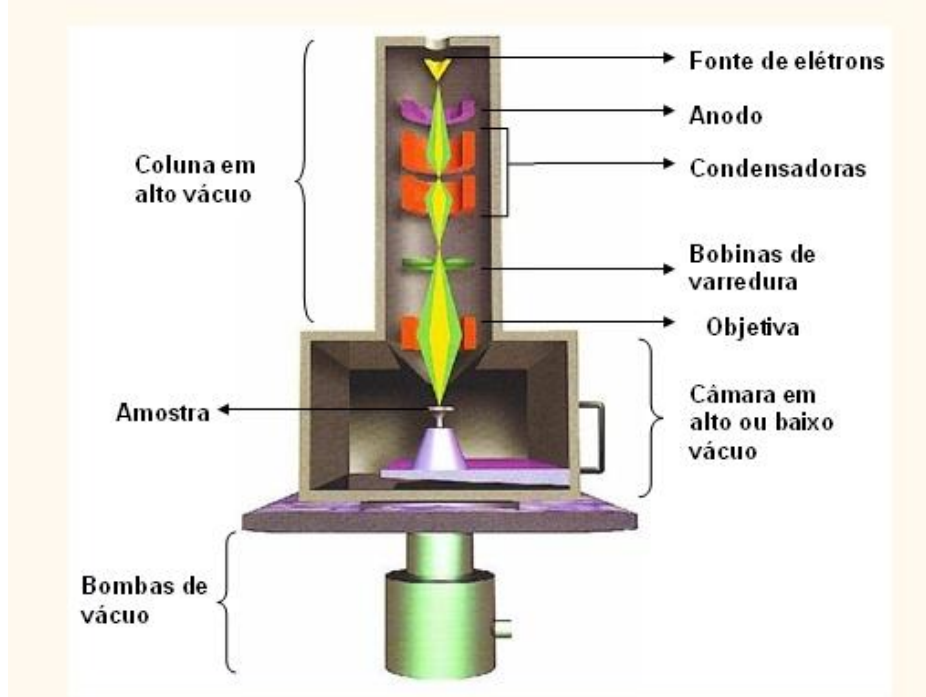


Fonte: Produzido pela Autora

O princípio de funcionamento da microscopia de varredura por feixe de elétrons (figura 3.23) é baseado na emissão de um feixe de elétrons através de um filamento de tungstênio com o auxílio de lentes eletromagnéticas (condensadoras e objetivas), de

diafragmas e de bobinas. Após a emissão deste feixe, ele incide sobre a amostra, provocando uma série de emissões de sinais relacionados com a interação deste feixe com a amostra (COSTA, 2006).

Figura 3.23 - Esquema do funcionamento do microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: USP, 2011.

Os sinais emitidos pela amostra encontram-se na forma de elétrons (secundários, retroespalhados, absorvidos, transmitidos, dentre outros) e de fótons (fotoluminescentes e raios X), que são captados por detectores apropriados, amplificados e processados num sistema analisador específico para cada sinal. Os detectores identificam a intensidade dos sinais, formando a imagem em um monitor com ampliação de até 300000 vezes (COSTA, 2006).

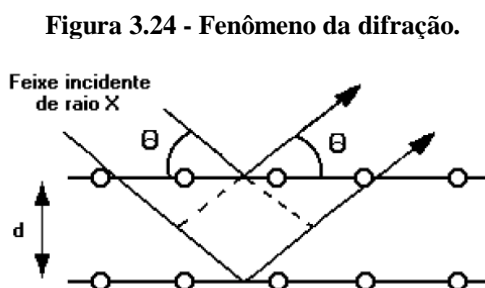
As principais aplicações do MEV são a identificação de fases constituintes e de segregações, a análise de fratura e a caracterização microestrutural em geral (COSTA, 2006).

Com o auxílio de acessórios é possível ainda realizar análises química qualitativa e semiquantitativa (EDS – espectroscopia de raios-X dispersivo em energia) (CALLISTER, 2002).

3.3.2 Difração de raios-X

O princípio de geração dos raios-X necessários ao uso da técnica de difração de raios-X considera que a colisão de elétrons de um cátodo acelerado com elétrons de um ânodo metálico converte parte da energia dos elétrons em raios X. Quando o feixe de raios X passa através de uma matéria, a sua energia diminui devido à absorção e ao retroespalhamento. Se o retroespalhamento acontece no interior de um material cristalino, com cristais ordenados, ocorrem interferências, que resultam na difração de raios X (COSTA, 2006).

Para que ocorra a difração dos raios-X (figura 3.24) é necessário que o espaçamento entre as camadas de átomos tenham aproximadamente o mesmo tamanho do comprimento de onda da radiação, e que os centros espalhadores estejam espacialmente distribuídos em um arranjo altamente regular (COSTA, 2006).



Fonte: COSTA, 2006, p. 34.

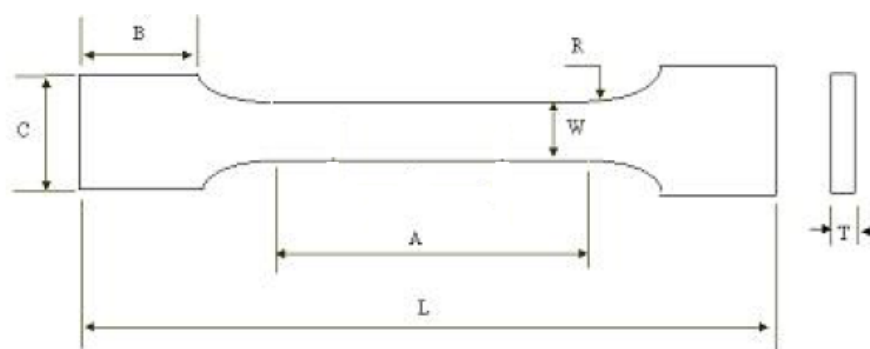
A difração de raios-X é utilizada para a identificação qualitativa de compostos cristalinos e para fornecer informações quantitativas sobre os compostos presentes em uma amostra sólida policristalina. Dentre outras aplicações tem-se também a determinação de diagramas de fases e o acompanhamento do efeito da deformação nas redes cristalinas (COSTA, 2006).

3.3.3 Ensaios destrutivos

O comportamento mecânico dos materiais reflete uma resposta ou deformação a uma carga ou força. As propriedades mecânicas dos materiais são analisadas através de experimentos laboratoriais que reproduzem as suas condições de serviço (CALLISTER, 2002):

a) Ensaio de tração: consiste em deformar um corpo de prova (figura 3.25), de dimensões estabelecidas, até a sua fratura, mediante um aumento de carga que é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo mais comprido do corpo de prova. O corpo é preso pelas suas extremidades nas garras de fixação da máquina de ensaio, sendo esta programada para alongar o corpo a uma taxa constante, além de medir a carga instantânea aplicada (com uma célula de carga) e os alongamentos resultantes (com um extensômetro). O resultado do ensaio de tração é um gráfico de tensão x deformação, onde se determina valores como o limite de escoamento do material, o limite de resistência à tração, o limite de ruptura, a ductilidade, a resiliência e a tenacidade do material avaliado (CALLISTER, 2002);

Figura 3.25 - Corpo de prova para ensaio de tração.



L = comprimento total do corpo de prova
 A = comprimento da parte útil do corpo de prova
 W = largura da parte útil do corpo de prova
 T = espessura do corpo de prova
 R = raio de concordância
 B = comprimento da garra
 C = largura da garra

Fonte: CÂNDIDO, 2003, p. 101.

b) Ensaio de cisalhamento e de torção: consiste em ensaios no qual a força aplicada é puramente cisalhante, sendo que no ensaio de torção as forças torcionais geram um movimento de rotação em torno do eixo longitudinal (CALLISTER, 2002);

c) Ensaio de dureza: realiza a medição da resistência a deformação plástica localizada. Nos ensaios de dureza (Rockwell, Brinell, Vickers, Knoop), um penetrador é forçado contra a superfície dos materiais (figura 3.26). O resultado do ensaio é um número índice de dureza, determinado pelo tamanho ou profundidade da impressão resultante do penetrador na amostra. Quanto mais macio o material, maior e mais profunda é a impressão e menor é o número índice de dureza (CALLISTER, 2002).

Figura 3.26 - Durômetro Rockwell



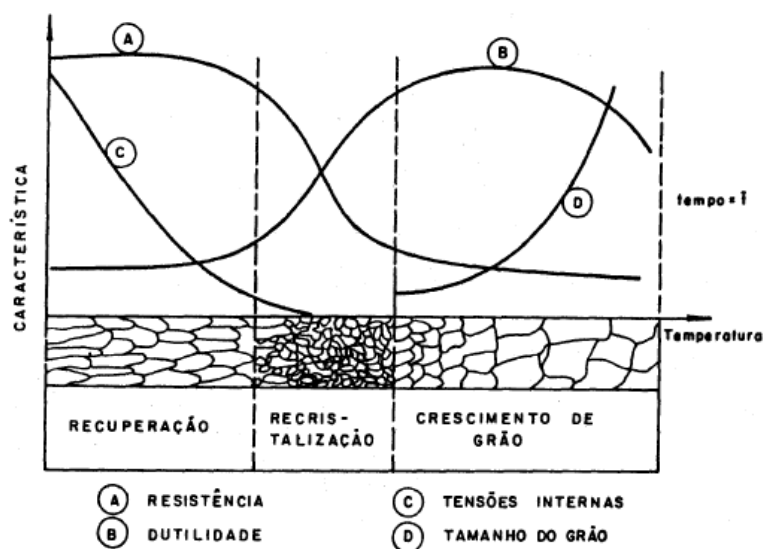
Fonte: Produzido pela Autora

3.3.4 Tratamento térmico

O tratamento térmico é um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento sob condições controladas de temperatura, de tempo, de atmosfera do forno e de velocidade de resfriamento.

O objetivo de um tratamento térmico é alterar as propriedades dos materiais ou conferir características específicas ao mesmo (figura 3.27). Neste caso, o material pode vir a experimentar alguns fenômenos em função da temperatura em que o mesmo é aquecido, tais como a recuperação, a recristalização e o crescimento do tamanho de grão.

Figura 3.27 - Alteração das propriedades do material em função da recuperação, recristalização e do crescimento de grão.



Fonte: BRESCIANI, 2011, p. 126.

Os principais tipos de tratamentos térmicos para os materiais metálicos são:

- recozimento: tratamento cujo objetivo geral é remover efeitos de processamento anteriores. O procedimento geral consiste em aquecimento até a região austenítica ou abaixo desta em função da composição química e dos objetivos deste tratamento (remoção de tensões residuais, por exemplo), encharque e resfriamento lento, normalmente conduzido no interior do próprio forno ou mesmo ao ar em função das dimensões do material;
- normalização: neste caso, o objetivo é refinar e uniformizar a microestrutura. O procedimento consiste basicamente no aquecimento até a temperatura de austenitização, encharque e resfriamento ao ar;
- têmpera: o objetivo principal é endurecer o material através de transformação martensítica. O procedimento consiste em aquecimento até a temperatura de austenitização, encharque e resfriamento controlado em termos de temperabilidade do material (água, óleo, banho de polímero, salmoura, nitrogênio, ar);
- revenimento: o objetivo deste tratamento é restituir a tenacidade da peça temperada. Seu procedimento baseia-se em reaquecimento da peça temperada até uma temperatura abaixo da austenitização, encharque e resfriamento ao ar.

4 METODOLOGIA

4.1 Material

Chapas do aço inoxidável ferrítico AISI 430 do tipo 430A foram utilizadas no estudo da estampabilidade deste material em função das condições de processamento aplicadas ao mesmo.

O tipo de aço AISI 430A é o tipo mais comum de aço inoxidável ferrítico utilizado nas siderúrgicas. Este aço não é estabilizado com a adição de elementos de liga como o nióbio para, dentre outros objetivos, formar carbonetos e assim, evitar a formação de carbonitretos que dificultam, por exemplo, a soldagem destes aços.

As chapas possuem espessura inicial de 1mm e todos os testes (exceto aqueles necessários à identificação da anisotropia do material) foram conduzidos na direção de laminação original da chapa, ou seja, a 0°.

4.2 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica do material foi realizada a partir de ensaios de tração uniaxial até a fratura. A anisotropia do aço inoxidável ferrítico também foi analisada mediante a condução de testes de tração em corpos de prova retirados a 0°, a 45° e a 90° em relação à direção de laminação original da chapa, mas neste caso, os corpos de prova foram deformados em tração até 0,12 de deformação convencional.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaios universais *Instron 5582* com sistema de aquisição de dados *Blue Hill 2* e extensômetro mecânico (tipo agulhas) com 25mm de abertura com célula de carga com capacidade de 100kN (útil de 90kN).

Os ensaios foram executados com taxa de deformação inicial de $0,001\text{s}^{-1}$ (ajuste da velocidade de deslocamento do cabeçote da máquina de ensaios de 4,5mm/min) com uso de corpos de prova com seção transversal retangular (135mm x 12,5mm x 1,0mm, isto é, comprimento total x largura útil x espessura inicial) de acordo com as recomendações previstas pela norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) E-8, figura 4.1.

Figura 4.1 - Desenho do corpo de prova de tração utilizado nos ensaios para a caracterização mecânica do aço AISI 430, medidas em milímetros.



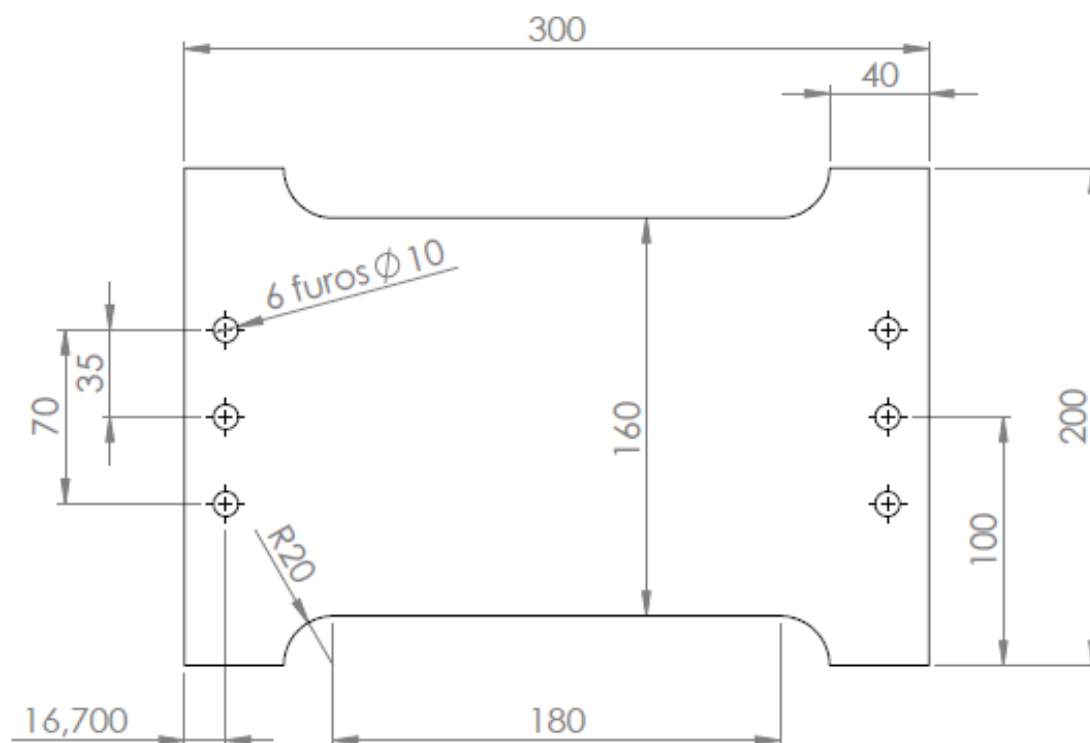
Fonte: Produzido pela Autora

4.2.1 Pré-deformação em tração

Para permitir a estampagem do material previamente deformado em tração, fez-se uso de um corpo de prova de tração largo, como esquematizado na figura 4.2.

As dimensões deste corpo de prova seguiram as recomendações quanto à relação entre a largura e o comprimento úteis previstos em norma e a necessidade para a fixação do mesmo à máquina de ensaios universais, figura 4.3.

Figura 4.2 - Desenho do corpo de prova de tração utilizado para a pré-deformação em tração do aço AISI 430 para posterior processamento deste material, medidas em milímetros.



Fonte: Produzido pela Autora

Figura 4.3 - Dispositivo utilizado para o ensaio de tração em chapas largas.



Fonte: Produzido pela Autora

Os corpos de provas de tração largos foram tracionados até os seguintes valores de deformação convencional: 0,021 (corpo de prova recozido – amostra 1); 0,014 (corpo de prova recozido – amostra 2); 0,019 (corpo de prova no estado como recebido – amostra 3) e de 0,012 (corpo de prova no estado como recebido – amostra 4).

O parâmetro de ductilidade identificado no ensaio mecânico foi o alongamento uniforme (AU), correspondendo ao valor da deformação convencional no ponto de carga ou de tensão máxima descontado do respectivo valor de deformação elástica proveniente do retorno elástico do aço AISI 430. Neste caso, para a identificação do retorno elástico fez-se o traçado de uma linha reta com a mesma inclinação da região elástica da curva de tensão convencional-deformação convencional desde o ponto de tensão máxima (tensão limite de resistência à tração) até o eixo das abscissas (eixo da deformação convencional).

Os parâmetros de resistência mecânica identificados no ensaio de tração foram a tensão limite de escoamento, LE, e a tensão limite de resistência à tração, LRT. O primeiro item foi calculado ao considerar o valor da tensão da curva tensão convencional em função da deformação convencional desvia de uma deformação a partir da inclinação da região elástica por uma quantidade correspondente a 0,2% (0,002). Já o valor da tensão limite de resistência à tração, LRT, compreendeu a divisão do valor da carga máxima obtida no ensaio pela área inicial do corpo de prova, A_0 .

4.2.2 Anisotropia

A medida da capacidade de um material de resistir à deformação na espessura é uma informação importante nas diferentes operações de estampagem de chapas. Essa resistência

frequentemente muda com a direção da chapa, sendo assim, necessária a sua medição em operações de estampagem.

O coeficiente R de *Lankford* foi avaliado para estimar a anisotropia da chapa do aço inoxidável AISI 430. Neste caso, após o corte da chapa e a preparação de corpos de prova de tração a 0° , a 45° e a 90° em relação à direção de laminação original do aço AISI 430 fez-se a pintura dos mesmos com uso de tinta adequada (marcador industrial *Riscofer*) e a marcação com dimensões específicas, como identificado na figura 4.4.

Figura 4.4 - Corpo de prova utilizado para verificar a anisotropia do material.



Fonte: Produzido pela Autora

Antes do início do ensaio de tração, fez-se a medição dos segmentos 1-2, 2-3, 4-5 e 5-6 (dimensão usada na marcação foi igual a 20mm) e 1-4, 2-5 e 3-6 (dimensão usada na marcação foi igual a 8mm). Contudo, a dimensão considerada real desses segmentos foi avaliada mediante a digitalização dos corpos de provas marcados e o subsequente uso de um software de análise de imagens, *Image ProPlus 6.0*.

Assim, a medição desses segmentos foi feita antes e depois do ensaio de tração, sendo os corpos de prova deformados até o regime plástico, mas antes do ponto de carga máxima, escolhendo-se o valor de 0,12 de deformação convencional.

A medição do valor da espessura dos corpos de prova foi feita com uso de um paquímetro digital Mitutoyo *Absolute* com resolução de 0,01mm na região do comprimento útil e da largura do corpo na região marcada pela linha azul e assim como feito no caso dos segmentos, as medições foram feitas antes e após os ensaios de tração.

Com as medidas anotadas, os corpos de prova de tração foram tracionados e em seguida, digitalizados para identificação das dimensões dos segmentos e assim, avaliar a deformação verdadeira sofrida no comprimento e na largura com uso do software de análise de imagens *Image ProPlus 6.0*.

Os valores das distâncias antes e após o ensaio de tração foram utilizados para calcular a deformação verdadeira na largura e no comprimento do corpo de prova, e com estes dados foi possível calcular os fatores de anisotropia, como identificado pelas equações 4.1, 4.2 e 4.3.

$$R = \epsilon_w / \epsilon_t \quad (4.1)$$

Contudo, considerando a dificuldade de identificar corretamente o valor da deformação sofrida na espessura, adotou-se a conservação do volume, equação 4.2, e assim, fez-se o cálculo dos fatores de anisotropia a 0° , a 45° e a 90° , equação 4.3.

$$\epsilon_{comprimento} + \epsilon_{largura} + \epsilon_{espessura} = 0 \quad (4.2)$$

$$R = \frac{-\epsilon_{largura}}{(\epsilon_{largura} + \epsilon_{comprimento})} \quad (4.3)$$

A anisotropia planar, ΔR , e a anisotropia normal média, R_m , foram avaliadas para identificar a variação do fator de anisotropia com o plano da chapa (identificando a extensão do fenômeno de orelhamento) e para indicar uma referência da profundidade média a ser obtida em uma operação de estampagem (estampagem profunda), respectivamente.

O cálculo de ΔR e de R_m é feito a partir do cálculo dos fatores de anisotropia medidos a 0° , a 45° e a 90° da direção original de laminação da chapa, com uso das equações 3.5 e 3.6 mencionados anteriormente.

4.3 Calandragem

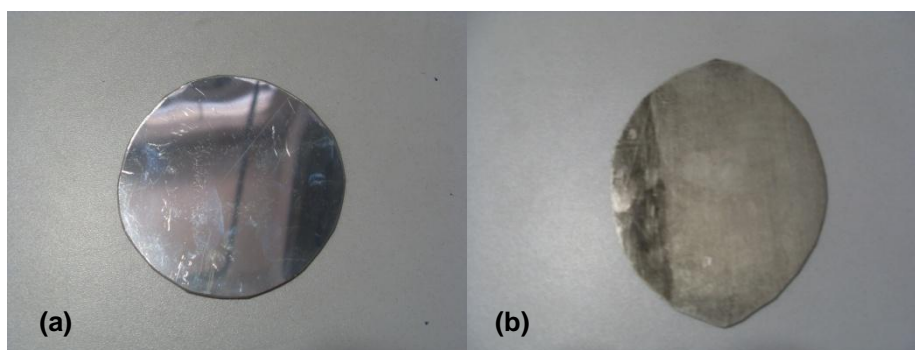
A calandragem das chapas do aço AISI 430 foi executada em uma calandra mecânica Imac do Laboratório de Calderaria do departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG com a utilização de cilindros de trabalho com diâmetro de 120mm.

As amostras calandradas foram deformadas mediante a redução sucessiva da distância entre os cilindros de trabalho (*gap*), sendo ambas as faces do material deformadas para cada uma das três distâncias do cilindro de trabalho.

A deformação convencional sofrida pelo aço AISI 430 após a operação de calandragem foi identificada a partir da medição do valor da espessura da chapa em três pontos distintos do material, com o uso de um micrômetro, antes e após a deformação plástica para em seguida, ser feito o cálculo da deformação convencional correspondente.

A figura 4.5 apresenta o aspecto de duas amostras do aço AISI 430, uma no estado como recebido, figura 4.5(a), e outra após a calandragem, figura 4.5(b), sendo possível observar a deformação da chapa em direção ao sentido de aplicação do esforço mecânico.

Figura 4.5 - Blanques: (a) no estado como recebido, (b) após o procedimento de calandragem.



Fonte: Produzido pela Autora

4.4 Tratamento Térmico

O tratamento térmico de recozimento foi realizado com o objetivo de restituir a ductilidade do aço AISI 430 que estava previamente deformado (encruado por laminação a frio), assim como para avaliar a influência dessa operação na estampabilidade (formação de imperfeições e presença de trincas) do aço AISI 430. Deste modo, este tratamento térmico foi conduzido com uso de um forno Brasimet (forno tipo mufla) do Laboratório de Tratamentos Térmicos do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG (figura 4.6) com temperatura de aquecimento ajustada para 900°C e tempo de encharque de 25 minutos com posterior resfriamento no interior do próprio.

Figura 4.6 - Forno Brasimet (forno tipo mufla).



Fonte: Produzido pela Autora

Este tratamento térmico foi realizado no material no estado como recebido e em seguida, o mesmo foi calandrado ou tracionado de acordo com as rotas de processamento apresentadas no item 4.5.

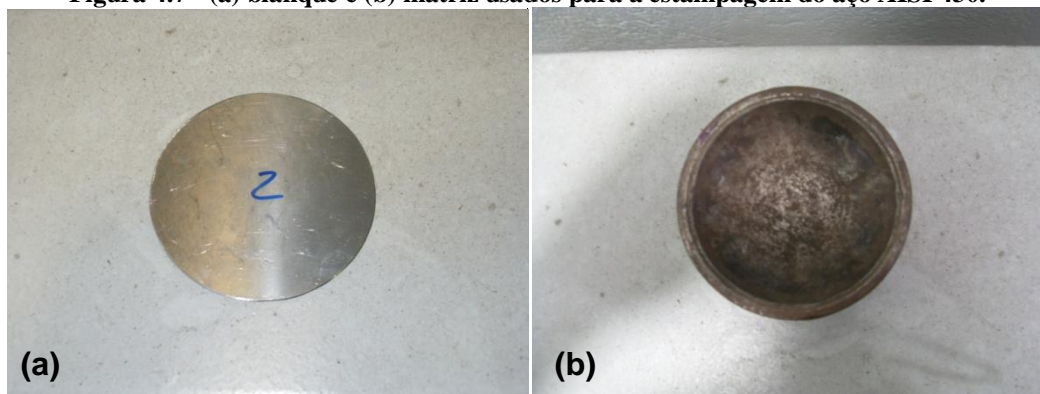
4.5 Estampagem

A estampagem foi realizada em oito rotas de processamento, sendo ela após: o estado como recebido, o recozimento, a calandragem, o tracionamento, o recozimento seguido de calandragem, o recozimento seguido de tracionamento, o tracionamento seguido de calandragem e o recozimento seguido de tracionamento e calandragem.

O teste de estampagem do aço AISI 430 iniciou com a determinação do diâmetro do blanque, (D), figura 4.7(a), de acordo com a previsão da equação 4.6 e uso dos valores do diâmetro interno da matriz, (d_i igual a 72mm), figura 4.7(b) e da altura da matriz (h igual a 4,0 mm).

$$D = \sqrt{(d_i^2 + 4 \times d_i \times h)} \quad (4.6)$$

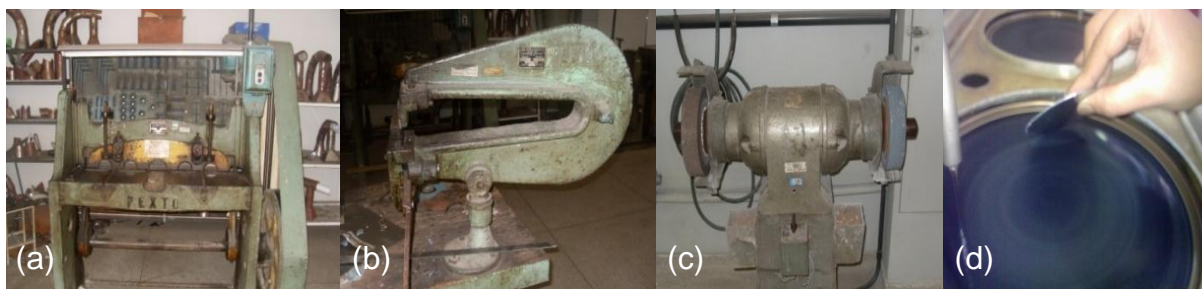
Figura 4.7 - (a) blanque e (b) matriz usados para a estampagem do aço AISI 430.



Fonte: Produzido pela Autora

Em seguida, as chapas foram cortadas em uma guilhotina Newton do Laboratório de Calderaria do departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG (figura 4.8(a)), com capacidade de corte para chapas com espessura de até 1,5mm e acabamento das extremidades feitos com uso de uma tesoura mecânica (figura 4.8(b)), deste mesmo laboratório. Para retirar as rebarbas e fazer o acabamento das bordas, a chapa foi esmerilhada, com o auxílio de um rebolo *Carborundum*, figura 4.8(c), e lixada (figura 4.8(d)).

Figura 4.8 - Processo de preparação dos corpos de prova: (a) guilhotina (b) tesoura mecânica (c) esmeril (d) lixa.

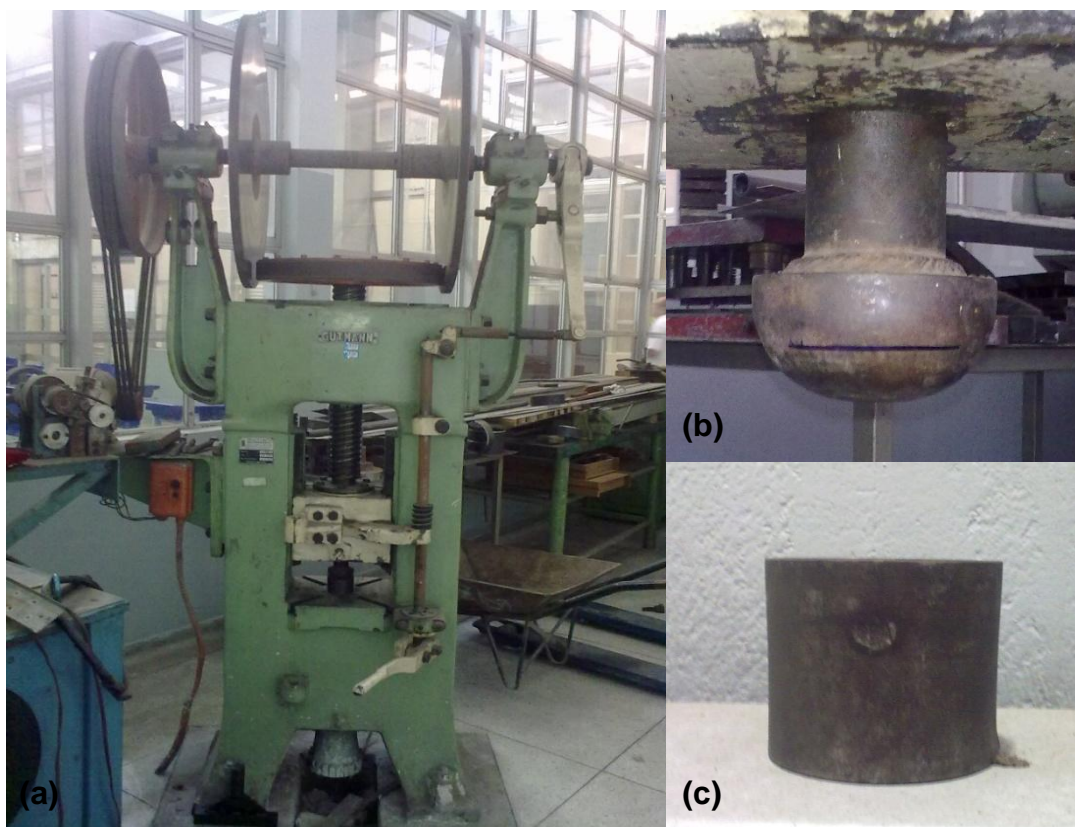


Fonte: Produzido pela Autora

Após o corte dos blanques, o material foi estampado em uma prensa mecânica por acionamento de prato *Gutmann* sem sistema de capacitação de dados e com capacidade de aplicação de carga de até 40×10^3 Kgf ($392,4 \times 10^3$ N), figura 4.9(a), mediante a utilização de um punção, figura 4.9(b) e de uma matriz com formato de um copo, figura 4.9(c).

A estampagem dos copos foi feita com um único golpe e sem o uso de prensa-chapas, abandonado o cutelo de uma altura de aproximadamente 300mm. O procedimento foi realizado sem a utilização de lubrificantes.

Figura 4.9 - Equipamento para a estampagem: (a) prensa mecânica Gutmann, (b) punção e (c) matriz.



Fonte: Produzido pela Autora

O limite de estampabilidade, dado pela razão do diâmetro do blanche (D igual a 80mm) pelo diâmetro do punção (d igual a 76mm), foi de 1,05.

A estampagem foi realizada para diferentes condições do material, em destaque:

- a) no estado inicial do material (estado como recebido);
- b) após a realização do ensaio de tração uniaxial em chapas largas. Neste caso, os corpos de prova de tração foram pré-deformados de (deformação convencional),
 - i) corpo de prova recozido (amostra 1) que foi deformado em tração de $e = 0,021$;
 - ii) corpo de prova no estado como recebido (amostra 4) que foi deformado em tração de $e = 0,012$.

Os valores de deformação convencional dos corpos de prova largo foram limitados devido à capacidade de carga da máquina de ensaios universais utilizada para a realização do ensaio de tração.

- c) após a condução da operação de calandragem sem o encurvamento da chapa. Nesta situação, estão listados abaixo os respectivos valores da deformação convencional em calandragem (variação da espessura) assim como a rota completa das amostras do aço AISI 430 antes da estampagem,

- iii) material no estado inicial que foi deformado em calandragem de $e = 0,076$;
- iv) material recozido que foi deformado em calandragem de $e = 0,113$;
- v) material tracionado (amostra 3, pré-deformada em tração de $e = 0,019$) seguido por deformação em calandragem de $e = 0,164$; deformação convencional total de 0,183;
- vi) material tracionado (amostra 4, pré-deformada em tração de $e = 0,012$) seguido por deformação em calandragem de $e = 0,172$; deformação convencional total de 0,184;
- vii) material recozido e tracionado (amostra 2, pré-deformada em tração de $e = 0,014$) acompanhado por deformação em calandragem de $e = 0,164$, deformação convencional total de 0,178.

- d) Após a realização do tratamento térmico de recozimento no material na condição inicial como recebido e deformado (em tração e em calandragem). Este tratamento foi realizado a 900°C , com um encharque de 25 minutos e resfriamento no interior do forno. Neste caso, a operação de estampagem foi executada nas seguintes condições,

- viii) material recozido a 900°C durante 25 minutos;
- ix) material recozido e tracionado de $e = 0,021$ (amostra 1);
- x) material recozido e calandrado de $e = 0,113$;
- xi) material recozido, tracionado de $e = 0,014$ (amostra 2) e calandrado de $e = 0,164$, deformação convencional total de 0,178.

Após cada operação de estampagem foram retiradas amostras para a análise microestrutural em regiões específicas do material para o estudo da evolução microestrutural e acabamento superficial em função das condições de processamento aplicadas ao material.

4.6 Caracterização microestrutural

A análise micrográfica do aço AISI 430 foi realizada de acordo com os procedimentos convencionais, compreendendo o corte das amostras no sentido longitudinal da chapa e na direção de laminação (conduzido com uso da cortadeira metalográfica do Laboratório de Metalografia do departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG), figura 4.10, com a utilização de um disco de corte de materiais com dureza variando de 35HRc até 50HRc, com o posterior embutimento a frio com uso de resina acrílica auto-polimerizante.

Figura 4.10 - Cortadeira metalográfica do laboratório de Metalografia.



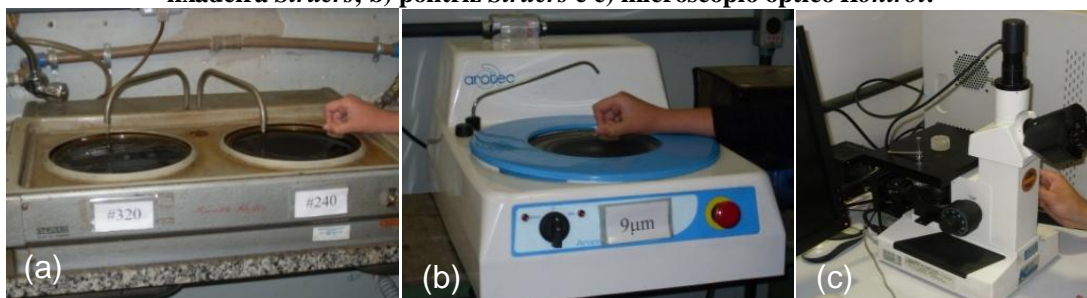
Fonte: Produzido pela Autora

As amostras embutidas foram lixadas em lixadeiras *Struers* (figura 4.11(a)) na seguinte sequência de lixas: 240#, 320#, 400#, 600# e 1200# *mesh*. Em seguida, as amostras foram polidas em uma politriz *Struers* (figura 4.11(b)) utilizando pasta de diamante com granulometria de 3 μ m, sendo utilizado o álcool etílico absoluto como lubrificante nesta operação.

Para a revelação da microestrutura utilizou-se o reativo *Vilella* modificado, cuja composição foi de 1g de ácido pícrico, 5mL de ácido clorídrico (HCl) e 100mL de álcool etílico (etanol). A amostra foi mergulhada no reativo por um período de aproximadamente 1 minuto, e em seguida, foi lavada em água corrente para interrupção do ataque. Com a

superfície seca através da evaporação do álcool etílico, auxiliada por jato de ar quente, foi possível a observação das fases presentes com uso do microscópio óptico *Kontrol* (figura 4.11(c)) acompanhado pela digitalização das imagens com a utilização de uma câmera acoplada ao microscópio.

Figura 4.11 - Apresentação dos equipamentos utilizados na análise microestrutural do aço AISI 430: a) lixadeira *Struers*, b) politriz *Struers* e c) microscópio óptico *Kontrol*.



Fonte: Produzido pela Autora

Com as imagens da micrografia foi possível calcular o tamanho de grão da amostra no seu estado inicial, com o auxílio do software comercial *Image Pro Plus 6.0*.

O procedimento de cálculo do tamanho de grão consistiu em selecionar cinco imagens com ampliação de 400 vezes, sendo selecionados 40 grãos em cada uma das imagens para efetuar a medição da área dos mesmos com uso do software *Image ProPlus 6.0*. Com os valores das áreas (A) de 200 grãos foi obtida a média aritmética total da área correspondente aos grãos e posteriormente, o diâmetro equivalente dos grãos (D) com uso da equação 4.7.

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (4.7)$$

A caracterização microestrutural do aço AISI 430 compreendeu ainda o uso do microscópio de varredura por feixe de elétrons (MEV) *Superscan SSX 550* da *Shimadzu*, figura 4.12.

Figura 4.12 - Microscópio de varredura por feixe de elétrons (MEV), *Superscan SSX 550*, *Shimadzu*.



Fonte: Produzido pela Autora

Após as operações de estampagem, os respectivos arranjos microestruturais assumidos pelo aço AISI 430 foram avaliadas nas regiões do material estampado que seriam investigadas para a análise microestrutural: no fundo, na quina e na borda do copo estampado, como identificado pela figura 4.13.

A área selecionada para a análise microestrutural do aço AISI 430 processado mecânica e termicamente foi a região da borda dos copos embutidos, por ser esta uma área que sofreu a maior quantidade de deformação plástica durante a operação de estampagem, devido o maior contato com o punção.

Figura 4.13 - Corpo de prova estampado com a identificação das regiões que foram retiradas amostras para a análise microestrutural.



Fonte: Produzido pela Autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização da composição química

A composição química do aço AISI 430, comparada com a faixa indicada pela siderúrgica APERAM é mostrada na tabela V. 1:

Tabela V. 1 - Composição química do aço AISI 430 (tipo 430A, % em peso).

Elemento	Teor (% em peso)	
	Referência*	Material
Cr	16,0 – 18,0	16,0657
Nb	-	0,4033
Si	1,00	0,3341
Ni	0,75	0,2448
Mn	1,00	0,2012
V	-	0,0360
P	0,04	0,0263
C	0,12	0,0197
Mo	-	0,0146
Al	-	0,0024
Ti	-	0,0037
S	0,03	0,0002

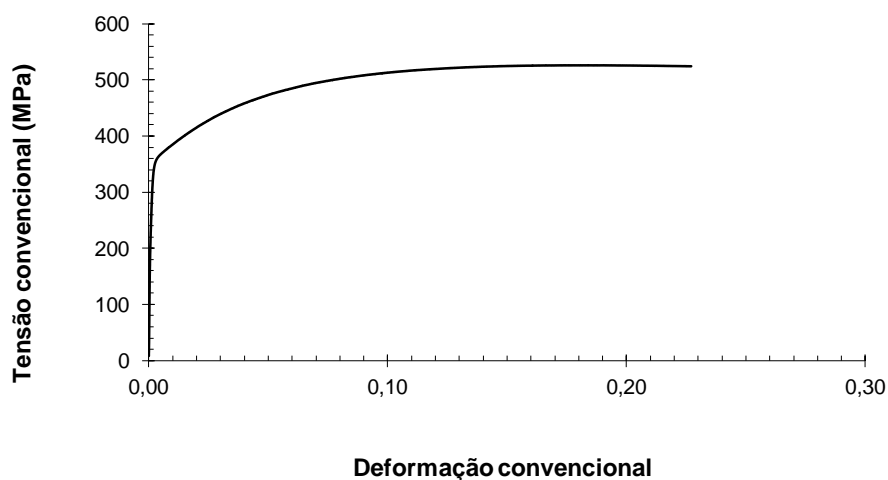
Fonte: * APERAM (ex Arcelor Mittal), 2006, p. 5.

5.2 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica realizada a partir da condução do ensaio de tração revelou o gráfico de deformação convencional versus deformação convencional exibido na figura 5.1 e o resumo das propriedades mecânicas (tensão limite de escoamento, a tensão limite de resistência à tração, o alongamento uniforme, o módulo de resiliência e o coeficiente de encruamento do material no estado como recebido), como mostrado na tabela V.2.

Os ensaios foram feitos em 2 corpos de prova e em seguida, calculados os valores de média e desvio padrão como expostos na tabela V.2.

Figura 5.1 - Gráfico de tensão convencional x deformação convencional do aço AISI 430.



Fonte: Produzido pela Autora

Tabela V. 2 - Propriedades mecânicas do aço AISI 430 medidas a 0°.

Corpo de prova	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU	Módulo de resiliência (MPa)	Coefficiente de encruamento
Média	358	525,8	0,185	0,358	0,171
Desvio Padrão	0,00	0,640	0,005	0,000	0,002

Fonte: Produzido pela Autora

Pela análise da tabela e do gráfico, pode observar que os valores para os corpos de prova foram muito semelhantes, determinando assim as propriedades mecânicas da chapa de aço inoxidável ferrítico 430, tipo 430A utilizada no trabalho. Os valores encontrados na prática estão superiores aos indicados na tabela III.2, provavelmente devido a diferenças de equipamentos de medição.

5.2.1 Anisotropia

Para a verificação da anisotropia foram preparados 9 corpos de prova, sendo 3 na direção de 0° à direção de laminação, 3 na direção de 45° à direção de laminação e 3 na direção de 90° à direção de laminação.

As figuras 5.2, 5.3 e 5.4 mostram os corpos de prova antes e após o ensaio de tração conduzido para avaliação da anisotropia do aço AISI 430.

Figura 5.2 - Corpo de prova retirado na direção de 0° da direção de laminação: (a) antes do ensaio de tração e (b) após o ensaio de tração.



Fonte: Produzido pela Autora

Figura 5.3 - Corpo de prova retirado na direção de 45° da direção de laminação: (a) antes do ensaio de tração e (b) após o ensaio de tração.



Fonte: Produzido pela Autora

Figura 5.4 - Corpo de prova retirado na direção de 90° da direção de laminação: (a) antes do ensaio de tração e (b) após o ensaio de tração.



Fonte: Produzido pela Autora

Com os dados sobre as medidas das distâncias e emprego das fórmulas da anisotropia (equações 4.1 até 4.5), foi possível determinar os fatores de anisotropia da chapa do aço inoxidável ferrítico AISI 430, tipo 430A (no estado como recebido) medidos a 0°, a 45° e a 90° em relação à direção de laminação original da chapa, além dos valores da anisotropia normal média e anisotropia planar, tabela V.3.

Tabela V.3 - Valores dos fatores de anisotropia, da anisotropia normal média (R_m) e da anisotropia planar ΔR para o aço AISI 430 no estado como recebido.

R_{0° (média)	R_{45° (média)	R_{90° (média)	R_m	ΔR
0,984	1,078	1,307	1,112	0,067

Fonte: Produzido pela Autora

Os resultados apresentados na tabela V.3 confirmam a anisotropia das chapas do aço AISI 430 (tipo 430A) pelo fato do valor da anisotropia planar, ΔR , ter sido maior que zero e pelos valores diferentes de R_{0° , de R_{45° e de R_{90° .

Observa-se ainda que, sendo o valor da anisotropia planar maior que zero, o fenômeno do orelhamento tende a ser identificado entre 0° e 90°, indicando que o início da deformação plástica será observado a 0° ou a 90° da direção de laminação original do aço AISI 430, tabela V.4.

A anisotropia normal média, R_m , registra um valor pouco significativo em termos do limite de resistência à deformação na espessura (R_m ligeiramente maior que a unidade, 1).

De modo geral, considerando os valores de ΔR (próximo de zero) e de R_m (maior que a unidade), pode-se afirmar que este material apresenta condições excelentes de estampagem, em termos da anisotropia.

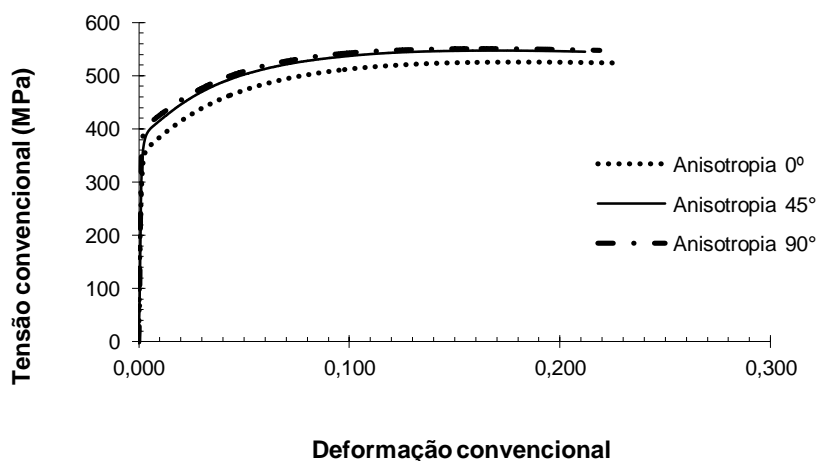
Tabela V. 4 - Propriedades mecânicas do aço AISI 430 medidas a 0°, 45° e 90°.

Anisotropia	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU
0°	360	526	0,181
45°	390	548	0,166
90°	400	551	0,158

Fonte: Produzido pela Autora

Outra medida da anisotropia do aço AISI 430 foi feita mediante o traçado da curva de tensão convencional versus deformação convencional para as três direções investigadas para o estudo dos fatores de anisotropia, figura 5.5.

Figura 5.5 - Gráfico de tensão convencional x deformação convencional dos corpos de provas a 0°, 45° e 90° da direção de laminação da chapa.



Fonte: Produzido pela Autora

Pode-se perceber, tanto pela análise da figura 5.5 como pelos dados apresentados na tabela V.4 que os valores da tensão limite de escoamento, LE, e da tensão limite de resistência à tração, LRT, aumentam entre 0° e 90°, porém a medida da ductilidade do aço AISI 430, alongamento uniforme, AU, foi decrescente nesta mesma ordem.

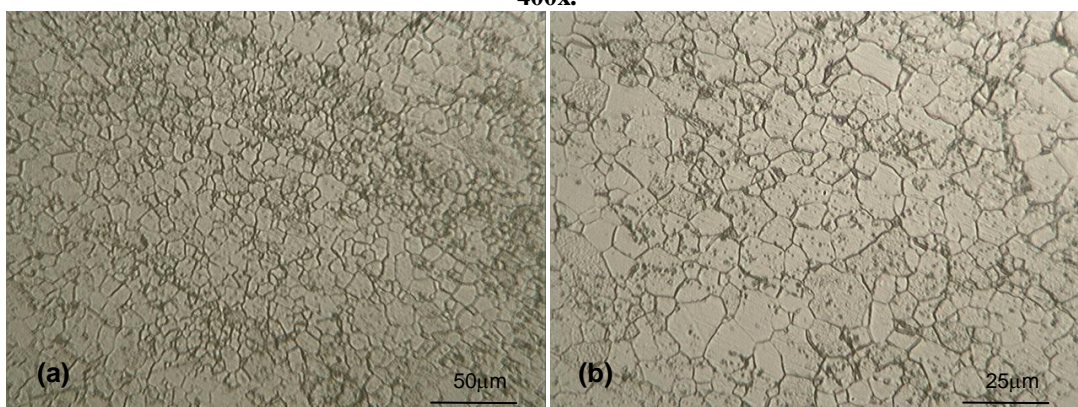
5.3 Caracterização microestrutural

O aspecto microestrutural apresentado pelo aço AISI 430 em função das condições de processamento aplicados ao mesmo serão apresentados a seguir. Embora o material não tenha sofrido nenhuma operação de conformação mecânica a quente, fez-se uso de tratamento térmico de recozimento entre os mesmos, o que serviu de parâmetro de estudo quanto à habilidade deste material ser estampado.

5.3.1 Estado como recebido

A figura 5.6 mostra o aspecto microestrutural apresentado pelo aço AISI 430 no estado como recebido de uma amostra retirada na direção de laminação. Pode-se notar os grãos ferríticos e a presença de possíveis precipitados ou contaminações.

Figura 5.6 - Fotomicrografias do aço AISI 430 no estado como recebido com ampliação de: (a) 200x e (b) 400x.

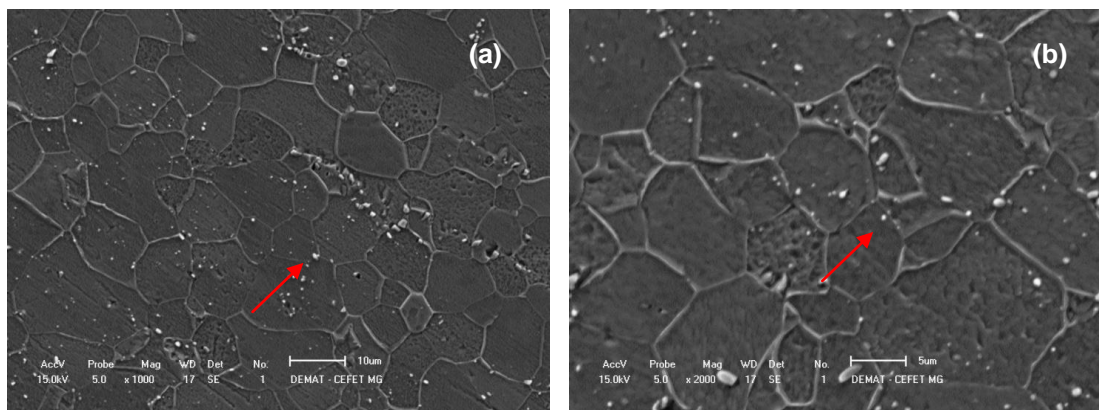


Fonte: Produzido pela Autora

O arranjo microestrutural apresentado pelo aço AISI 430 também foi investigado mediante o uso da microscopia de varredura por feixe de elétrons, MEV, figura 5.7. Nesta figura percebe-se a presença de alguns precipitados (indicados pelos pontos brancos, dentre os quais, aqueles assinalados pelas setas). Nem todos os pontos brancos identificados na figura 5.7(a) e 5.7(b) são precipitados, alguns são contaminações (sujeira). Esses precipitados não foram identificados completamente pela técnica de microanálise (EDS).

Por fim, fez-se a medição do tamanho de grão inicial do aço AISI 430 como sendo igual a 10,56µm, indicando a granulometria fina deste material no estado como recebido.

Figura 5.7 - Fotomicrografias do aço AISI 430 no estado como recebido obtidas por microscopia de varredura com ampliação de: (a) 1000x e b) 2000x.

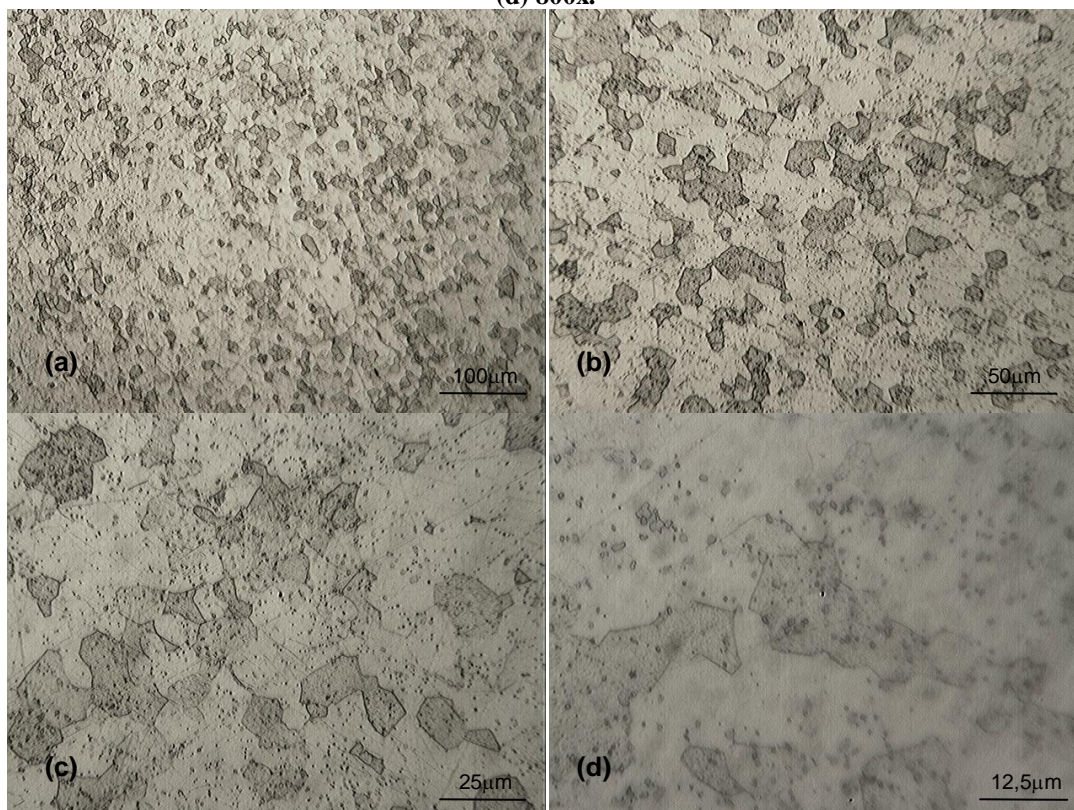


Fonte: Produzido pela Autora

5.3.2 Recozido

A figura 5.8 mostra a micrografia do AISI 430 A após o tratamento térmico de recozimento.

Figura 5.8 - Fotomicrografias do aço AISI 430 recozido com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.



Fonte: Produzido pela Autora

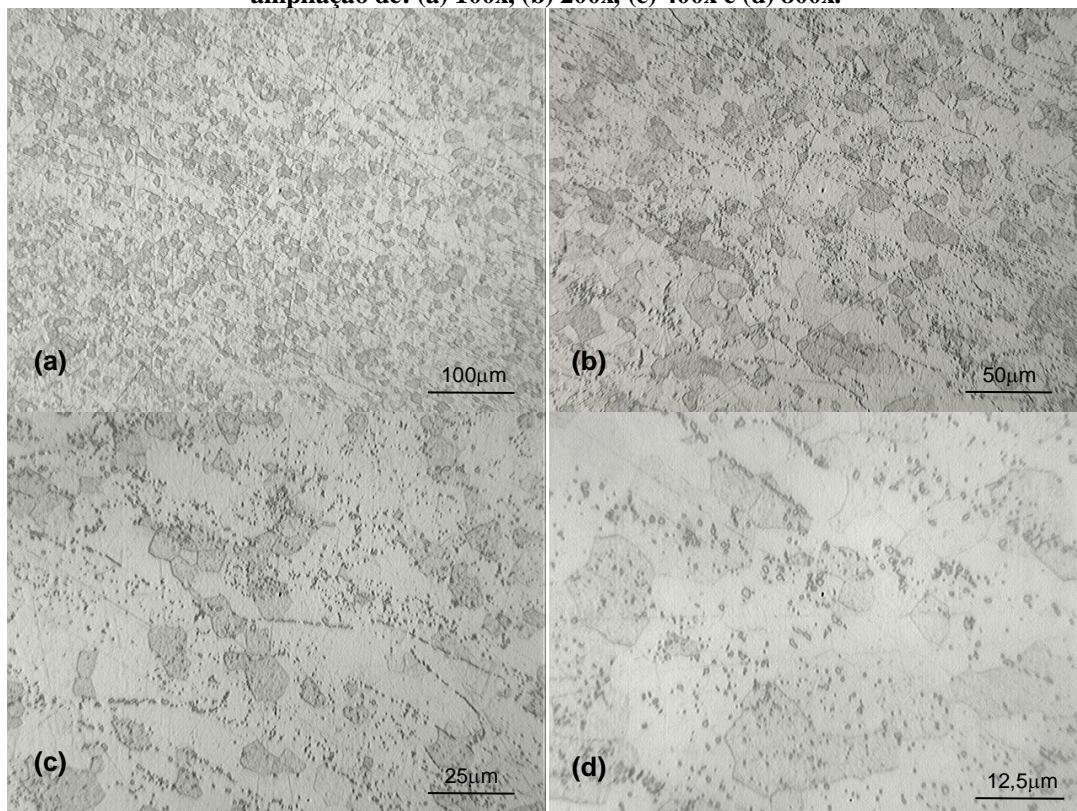
A análise das figuras 5.8(b) e 5.6(a) revelam o crescimento “suave” do tamanho de grão do aço AISI 430 após o tratamento térmico de recozimento. Contudo, o interesse maior na execução do recozimento foi alterar a condição inicial do material e reduzir os efeitos do processamento mecânico a frio decorrentes do estado inicial deste material, como a redução da densidade de discordâncias, não investigada neste trabalho.

5.3.3 Material estampado

Como mencionado no item 4.6, a retirada de material para a análise microestrutural das amostras estampadas foi selecionada a partir de três regiões do copo a serem avaliadas: borda, quina e fundo do copo embutido (vide indicações na figura 4.13).

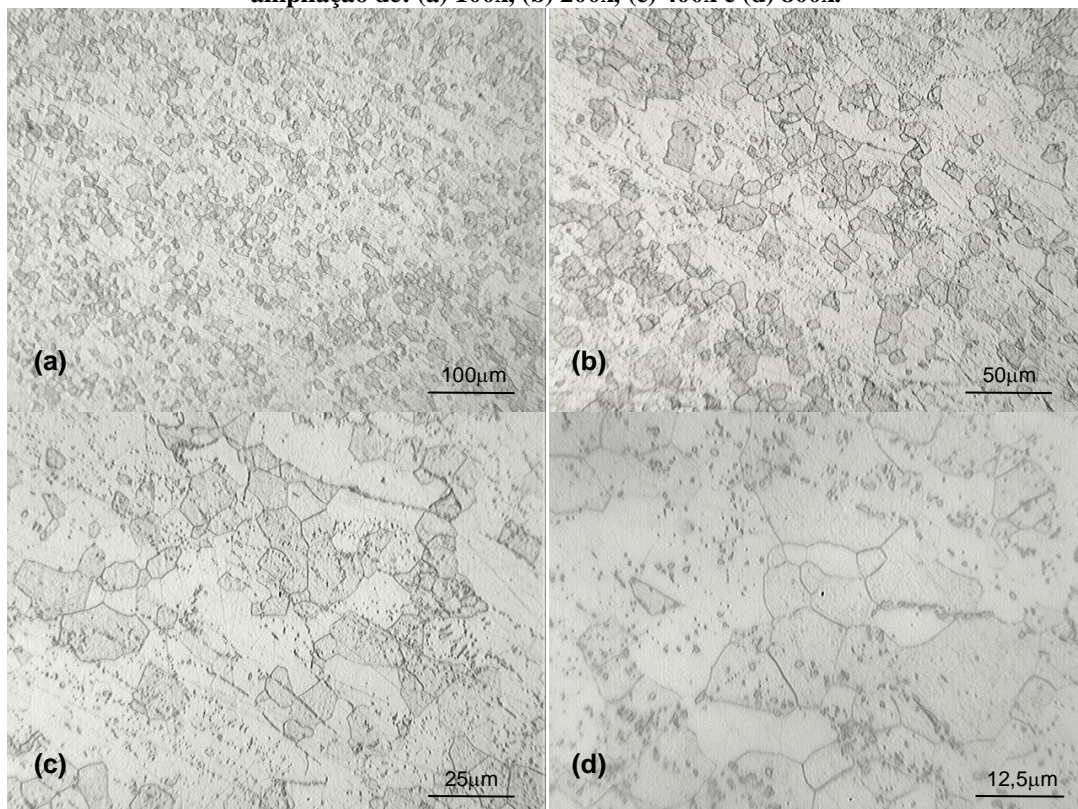
A microestrutura do material estampado diretamente, sem nenhum processamento anterior a essa operação foi realizada nestas regiões, como mostram as figuras 5.9, 5.10 e 5.11. Pelas imagens pode-se notar que não existe mudança significativa de uma região em relação à outra.

Figura 5.9 - Fotomicrografias do aço AISI 430 como recebido (região do fundo) que foi estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.



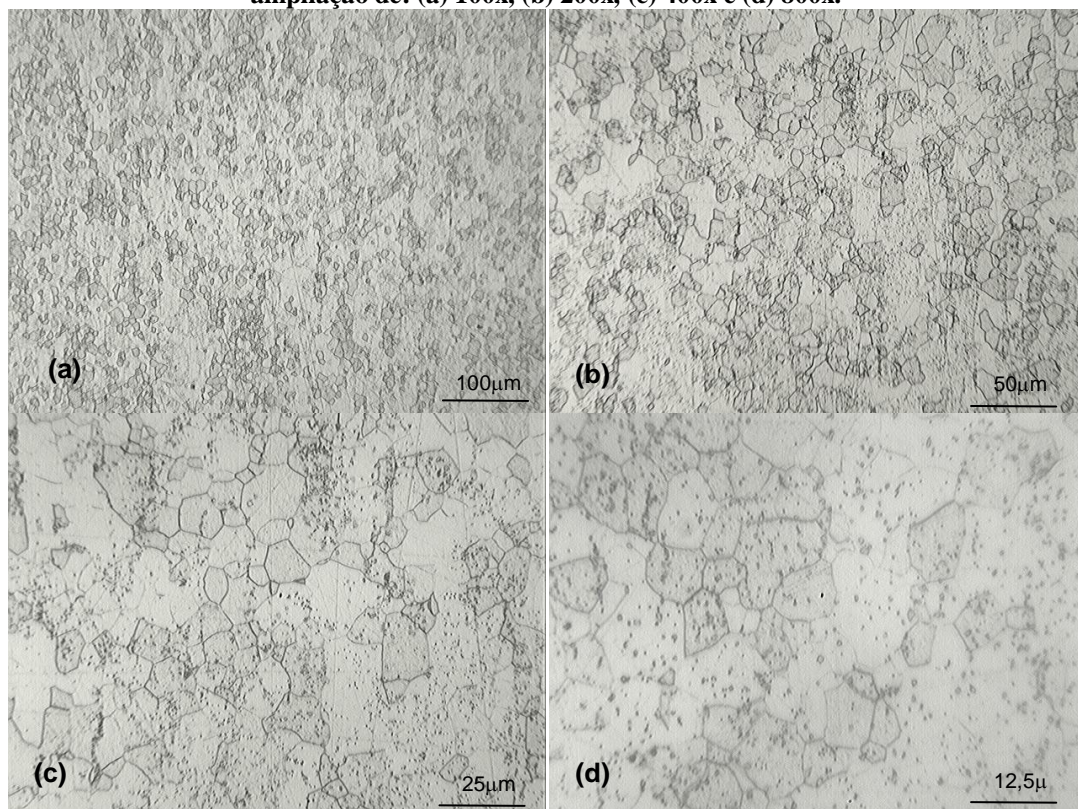
Fonte: Produzido pela Autora

Figura 5.10 - Fotomicrografias do aço AISI 430 como recebido (região da quina) que foi estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.



Fonte: Produzido pela Autora

Figura 5.11 - Fotomicrografias do aço AISI 430 como recebido (região da borda) que foi estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.



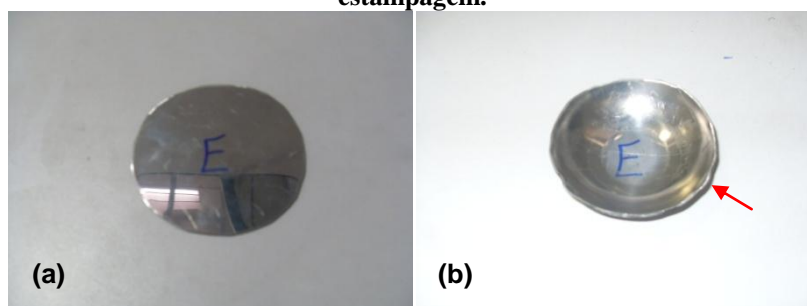
Fonte: Produzido pela Autora

Deste modo, escolheu-se a região da borda como a principal área a ser analisada nas demais micrografias, devido à similaridade com as outras áreas e por sofrer maior deformação em contato direto com o punção durante a estampagem do aço AISI 430.

A figura 5.11 exibe o aspecto microestrutural da região da borda do copo estampado do aço AISI 430. Comparando-se esta figura com a figura 5.6(b) é possível observar que a granulometria do material estampado está ligeiramente alongada em relação ao detectado para o material no estado como recebido, figura 5.6(b), apesar da presença de sujeira e do ataque incompleto dos contornos de grão do aço AISI 430.

O aspecto macroscópico do aço AISI 430 antes e após a estampagem é mostrado na figura 5.12. Percebe-se que o mesmo não apresentou evidências significativas da presença de problemas comuns na estampagem de chapas, como trincas, embora seja possível observar a presença do fenômeno de “orelhamento” (seta vermelha) devido basicamente ao fato de a estampagem ter sido feita sem o uso de um prensa-chapa.

Figura 5.12 - Amostras do AISI 430 no estado como recebido: (a) antes da estampagem, (b) após a estampagem.



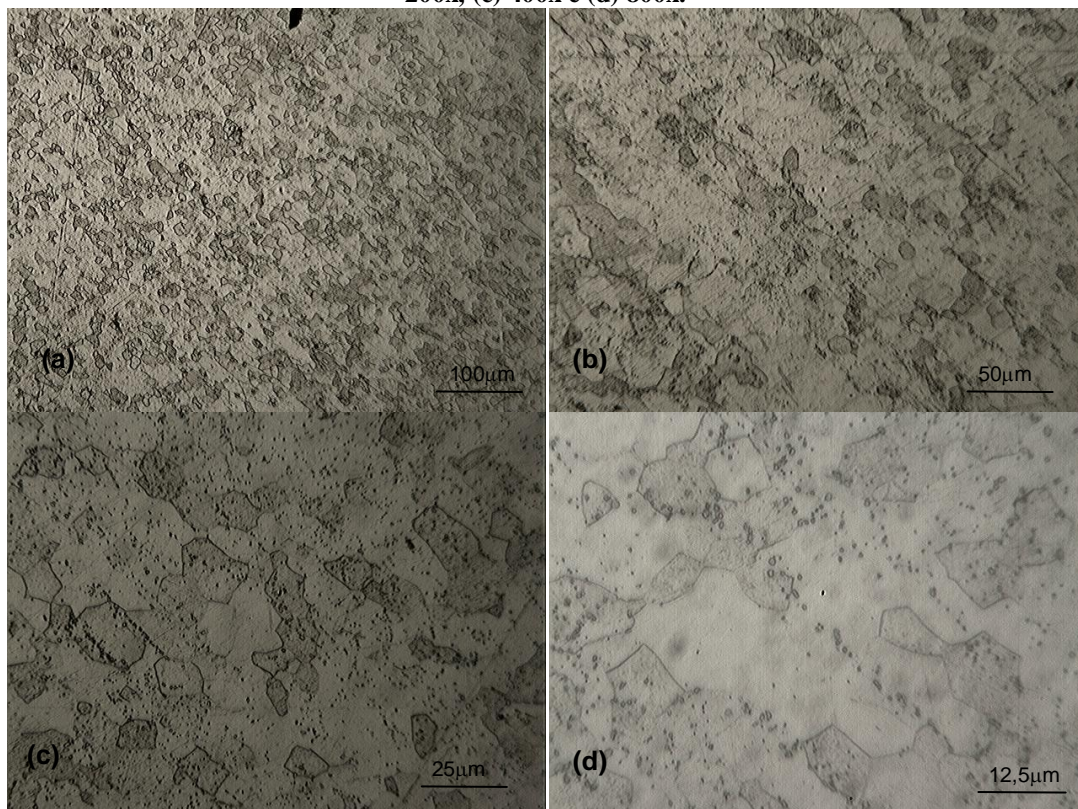
Fonte: Produzido pela Autora

5.3.4 Material estampado (com tratamento térmico anterior à estampagem)

Com o objetivo de avaliar a influência da condução de tratamento térmico anterior à operação de estampagem nos arranjos macro e microestrutural apresentados pelo aço AISI 430 fez-se a execução da rota tratamento térmico/estampagem.

Com a condução do tratamento térmico de recozimento antes da operação de estampagem, verifica-se pela análise da figura 5.13 que não houve mudança significativa do arranjo microestrutural apresentado pelo aço AISI 430.

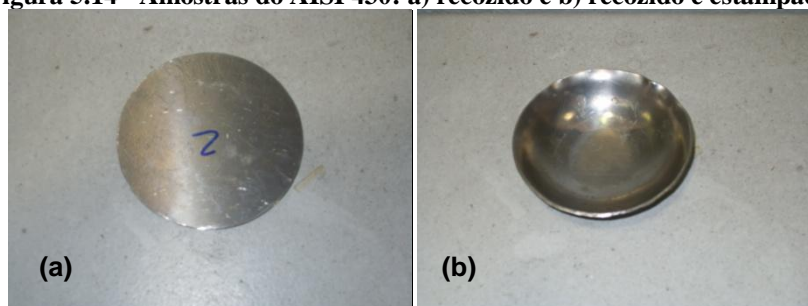
Figura 5.13 - Fotomicrografias do aço AISI 430 recozido e estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.



Fonte: Produzido pela Autora

O aspecto macroscópico do aço AISI 430 estampado após o tratamento térmico de recozimento revela a tendência de aumento da imperfeição “orelhamento”, figura 5.14. Um motivo para explicar esse resultado seria o provável aumento do tamanho de grão após o tratamento térmico do aço inoxidável ferrítico.

Figura 5.14 - Amostras do AISI 430: a) recozido e b) recozido e estampado.



Fonte: Produzido pela Autora

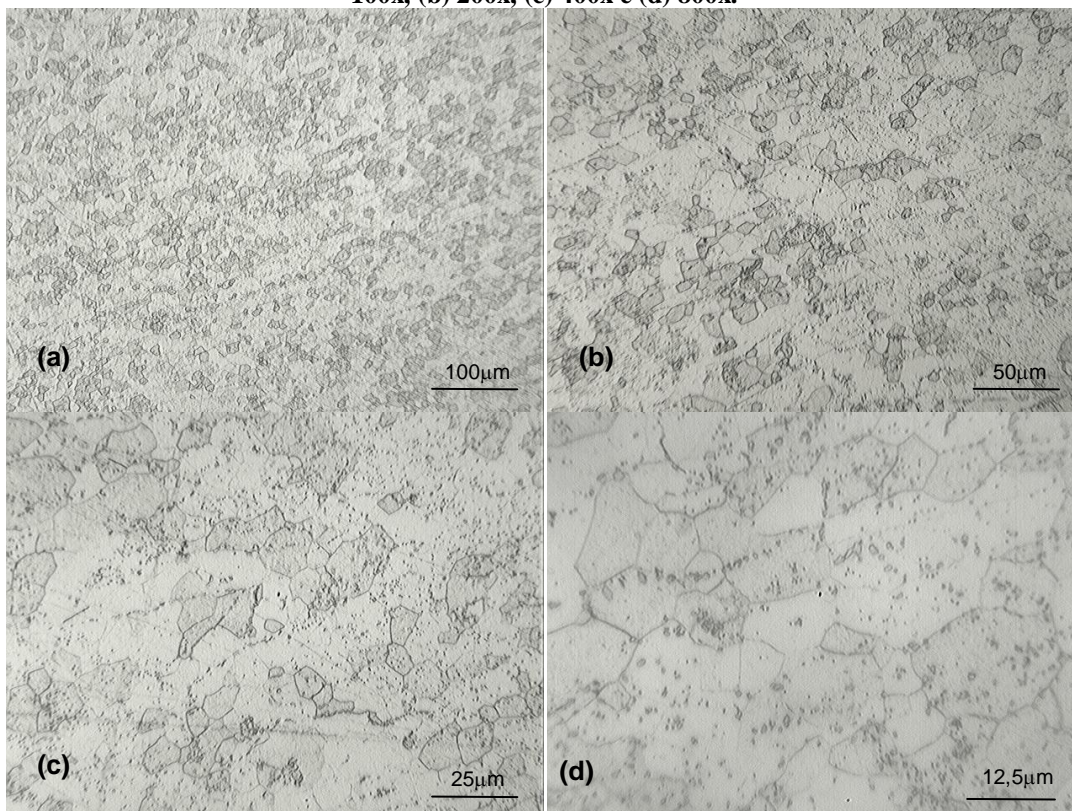
5.3.5 Rotas calandragem/estampagem e tração/estampagem (com e sem tratamento térmico prévio)

Dois modos de pré-deformação foram usados antes da operação de estampagem do aço AISI 430, calandragem e tração. Contudo, considerando que a quantidade de deformação plástica aplicada nesses modos de deformação foi diferente devido ao limite da célula de carga da máquina de ensaios universais, não é possível comparar diretamente a influência do tipo de solicitação mecânica aplicada na pré-deformação do aço AISI 430.

Com o objetivo de avaliar a influência da execução do tratamento térmico na evolução micro e macroestrutural apresentada pelo aço AISI 430 fez-se ainda as rotas tração/estampagem e calandragem/estampagem após a condução do tratamento térmico de recozimento.

Com relação ao efeito do modo de deformação na estampagem do aço AISI 430, as figuras 5.15 e 5.16 apresentam os arranjos micro e macroestrutural exibidos por este material após estampagem do material pré-deformado em calandragem.

Figura 5.15 - Fotomicrografias do aço AISI 430 calandrado ($\epsilon = 0,076$) e estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.



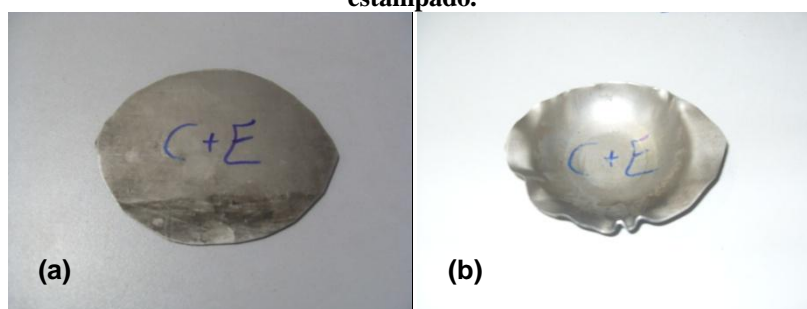
Fonte: Produzido pela Autora

Percebe-se como diferença significativa quando a figura 5.15(b) é comparada com a fotomicrografia do aço AISI 430 no estado como recebido, figura 5.6(b), e apenas estampado, figura 5.11(b), que a orientação cristalográfica foi maior, sendo isso indicado pelo maior alongamento preferencial dos grãos, como resultado do aumento da quantidade de deformação plástica aplicada ao material em calandragem.

O aspecto macroscópico do aço AISI 430 apresentado na figura 5.16 mostra a presença significativa do fenômeno de “orelhamento” no material estampado, pois a calandragem reduziu a espessura e aumentou a área superficial da chapa que foi estampada. Com este “excesso” lateral do blanke, figura 5.16 (a), e devido à falta do uso de um prensa-chapas o “orelhamento” foi significativo nesta condição do material.

Apesar da presença do “orelhamento”, não foi identificada a ocorrência de outras imperfeições na chapa estampada, como trincas.

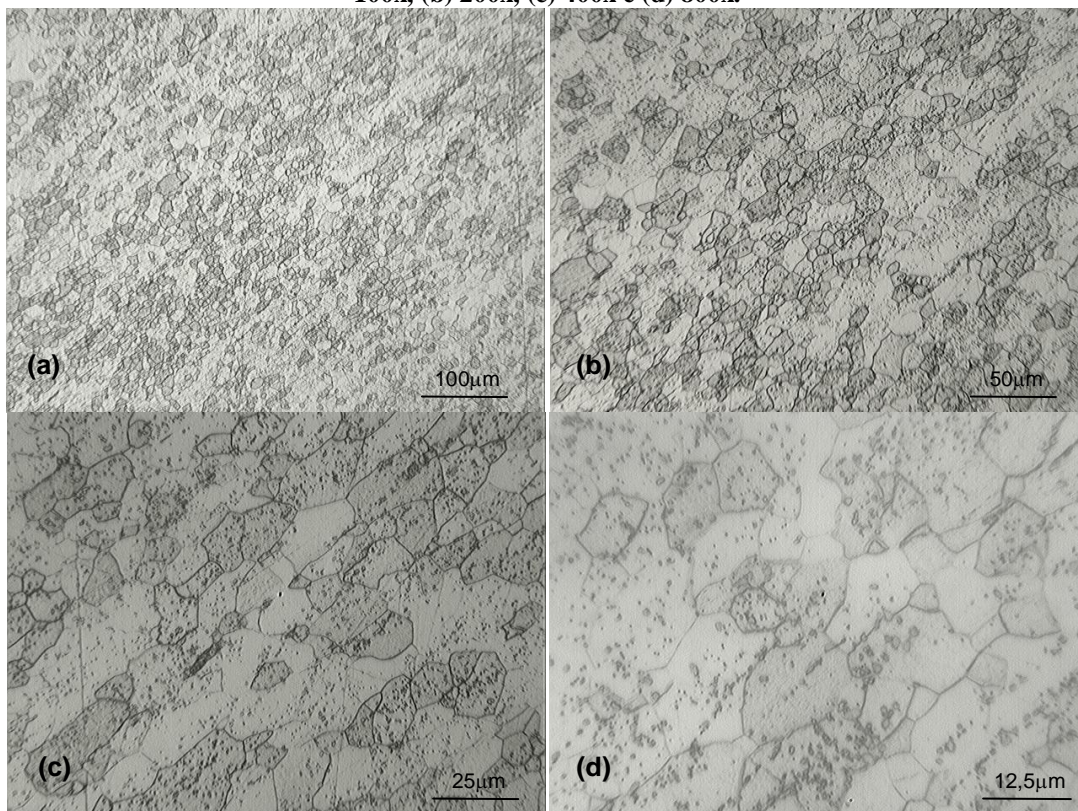
Figura 5.16: Amostras do aço AISI 430: (a) calandrado ($e = 0,076$) e (b) calandrado ($e = 0,076$) e estampado.



Fonte: Produzido pela Autora

Para o segundo modo de pré-deformação, tração, fez-se pré-deformação neste modo de deformação de 0,012. Desta forma, as figuras 5.17 e 5.18 apresentam os aspectos micro e macroestrutural apresentados pelo aço AISI 430 para após a pré-deformação em tração do aço AISI 430, respectivamente.

Figura 5.17 - Fotomicrografias do aço AISI 430 tracionado ($e = 0,012$) e estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.

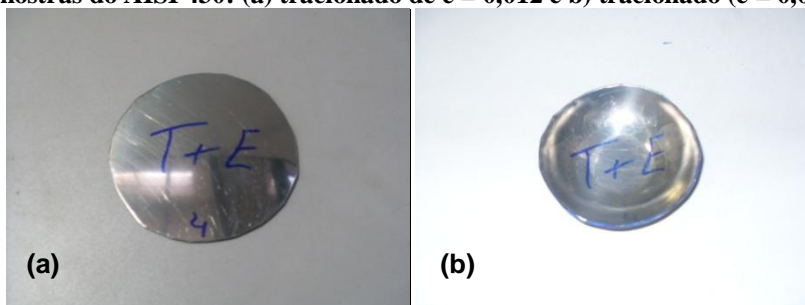


Fonte: Produzido pela Autora

Embora a quantidade de deformação plástica tenha sido pequena, $e = 0,012$, pode-se afirmar a partir da análise da figura 5.17(b), que a orientação dos grãos na direção de aplicação dos esforços mecânicos de calandragem e de tração foi semelhante.

A diferença significativa quanto ao modo e à quantidade de deformação plástica utilizados para a pré-deformação do aço AISI 430 está relacionada com a formação da irregularidade superficial “orelhamento”. A figura 5.18 revela que o aspecto macroscópico do corpo tracionado e estampado exibiu menor quantidade de imperfeições, assumindo o aspecto similar ao apresentado pelo material no estado como recebido que foi estampado.

Figura 5.18 - Amostras do AISI 430: (a) tracionado de $e = 0,012$ e b) tracionado ($e = 0,012$) e estampado.

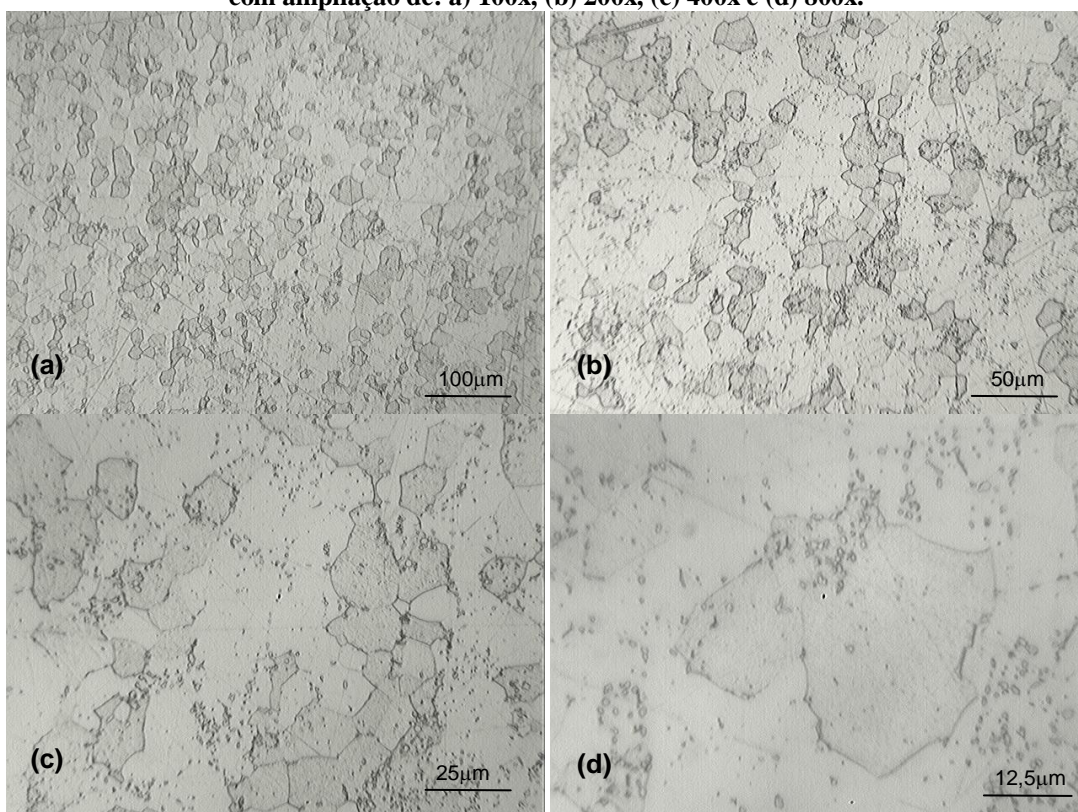


Fonte: Produzido pela Autora

A execução do tratamento térmico antes da pré-deformação e estampagem do aço AISI 430 foi feita para a pré-deformação em tração de 0,021 para avaliar a possível influência da condução do tratamento térmico nos aspectos micro e macroestrutural deste aço inoxidável após a estampagem.

Após a pré-deformação em tração de $\epsilon = 0,021$, nota-se apenas o crescimento do tamanho de grão, figura 5.19(b), quando comparado com o observado para a rota como recebido/estampado, figura 5.11(b), quando o tratamento térmico é feito antes da tração e da estampagem do aço AISI 430.

Figura 5.19 - Fotomicrografias do aço AISI 430 recozido, tracionado ($\epsilon = 0,021$, amostra 1) e estampado com ampliação de: a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.

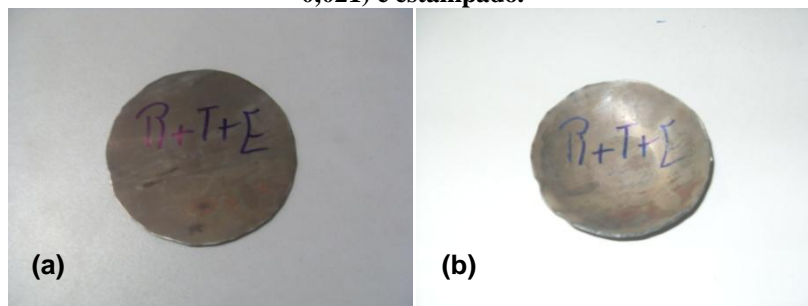


Fonte: Produzido pela Autora

Considerando que a quantidade de deformação plástica em tração foi pequena, não é percebido o alongamento significativo dos grãos, figura 5.19(b), quando comparado quando o modo e a quantidade de deformação plástica foram diferentes, isto é, na calandragem com deformação convencional de 0,076, figura 5.15(b).

Com relação ao arranjo macroestrutural nota-se o aumento da imperfeição “orelhamento” com a execução do tratamento térmico antes da deformação em tração e na própria estampagem do aço AISI 430, figura 5.20(b).

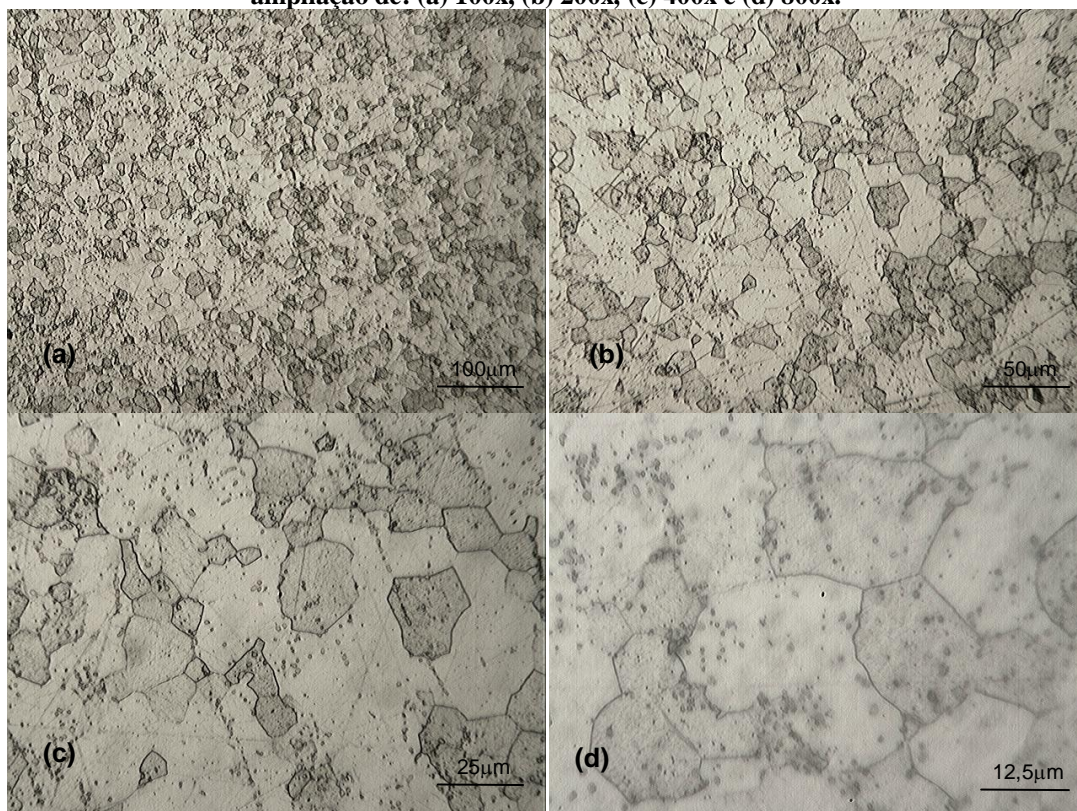
Figura 5.20 - Amostras do AISI 430: (a) recozido e tracionado ($e = 0,021$) e (b) recozido, tracionado ($e = 0,021$) e estampado.



Fonte: Produzido pela Autora

Por fim, fez-se a análise da condição micro, figura 5.21, e macroestrutural, figura 5.22, assumida pelo aço AISI 430 quando o tratamento térmico foi realizado antes da rota de processamento calandragem/estampagem, respectivamente. Contudo, deve-se destacar que adotando as mesmas condições para a operação de calandragem que, devido ao aumento do tamanho de grão provocado pela condução do tratamento térmico, que a quantidade de deformação plástica em calandragem foi maior, $e = 0,113$ contra $0,076$ no material sem ter sido tratado termicamente.

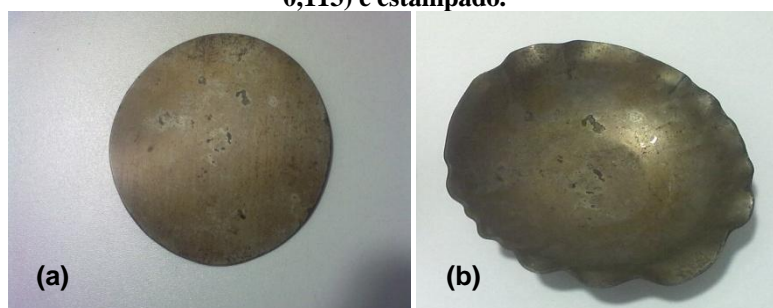
Figura 5.21 - Fotomicrografias do aço AISI 430 recozido, calandrado ($e = 0,113$) e estampado com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.



Fonte: Produzido pela Autora

Percebe-se assim, como observado quando o esforço mecânico posterior ao tratamento térmico de recozimento foi o de tração, o aumento do tamanho de grão, figura 5.21(b), e o aumento da imperfeição superficial “orelhamento”, figura 5.22(b), quando o tratamento térmico foi realizado antes da condução dos esforços mecânicos e da estampagem do aço inoxidável ferrítico.

Figura 5.22 - Amostras do AISI 430: a) recozido e calandrado ($e = 0,113$) e b) recozido, calandrado ($e = 0,113$) e estampado.



Fonte: Produzido pela Autora

5.3.6 Rota tração/calandragem/estampagem (com e sem tratamento térmico prévio)

A combinação dos esforços mecânicos de tração, de calandragem (tração e compressão) e daqueles envolvidos na operação de estampagem do aço AISI 430 serão exibidos a seguir para avaliar o efeito dos mesmos na condição de estampagem deste material.

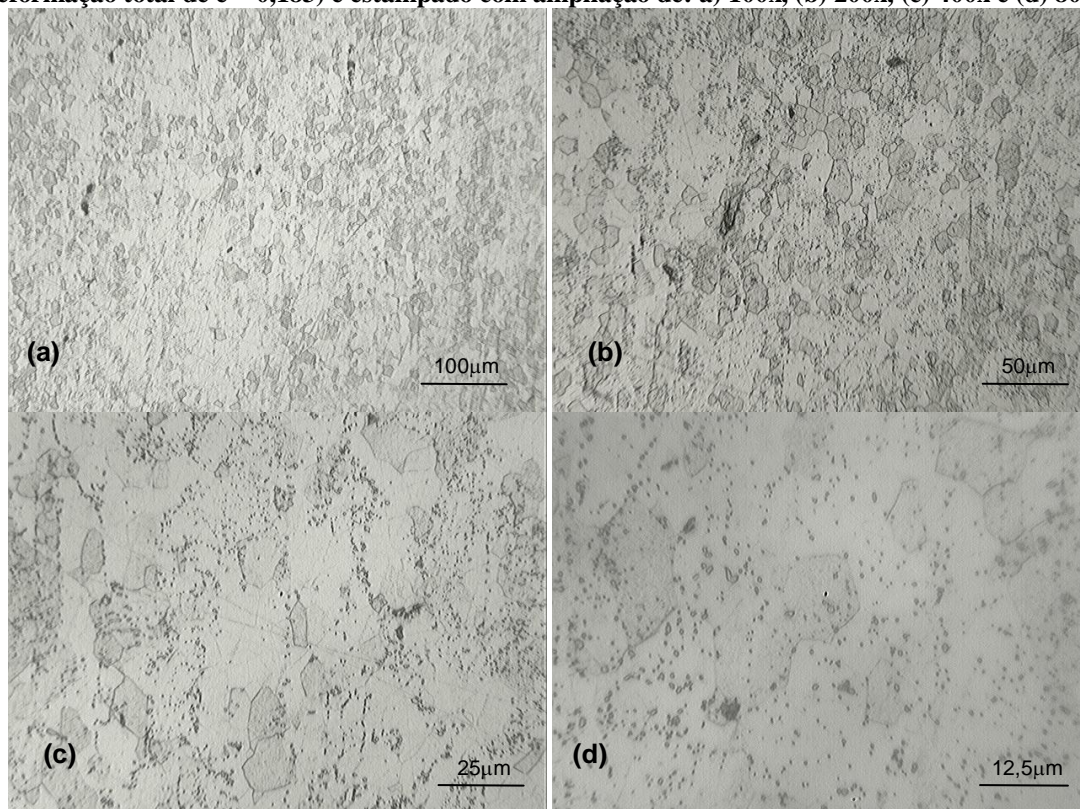
Neste caso, dois valores de deformação convencional total foram aplicados, 0,183 e 0,184, variando-se os valores da deformação convencional em tração e em calandragem.

Para o primeiro valor de deformação convencional total ($e = 0,019$ em tração e $e = 0,164$ em calandragem), a figura 5.23 revela que não houve mudança significativa com o acréscimo da quantidade de deformação plástica anterior à operação de estampagem, quando se compara com as fotomicrografias das rotas calandragem $_{e=0,076}$ /estampagem, figura 5.15(b), e tração $_{e=0,012}$ /estampagem, figura 5.17(b).

Contudo, quando se compara o aspecto macroscópico do material estampado nota-se a maior heterogeneidade quanto à orientação das bordas do copo estampado e a presença de indícios de outra irregularidade superficial, as estrias de estampagem (vide círculo marcado na figura 5.24(b)).

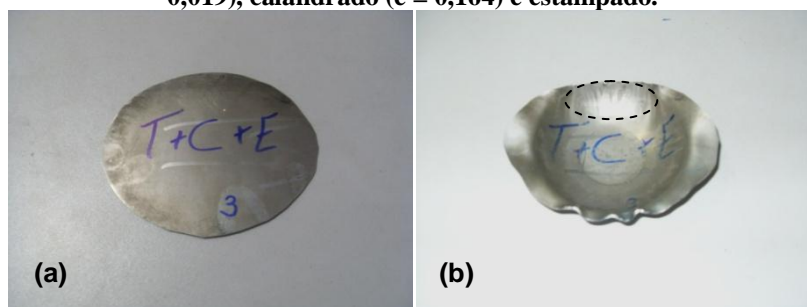
As estrias de estampagem, *roping*, estão relacionadas com a anisotropia plástica da estrutura cúbica de corpo centrado do aço AISI 430, com a heterogeneidade da orientação cristalográfica assumida por este material em função das condições de solitação mecânica e pela presença de nióbio que retarda a recristalização deste material (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

Figura 5.23 - Fotomicrografias do aço AISI 430 tracionado ($e = 0,019$, amostra 3), calandrado ($e = 0,164$, deformação total de $e = 0,183$) e estampado com ampliação de: a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.



Fonte: Produzido pela Autora

Figura 5.24 - Amostras do AISI 430: a) tracionado ($e = 0,019$) e calandrado ($e = 0,164$) e b) tracionado ($e = 0,019$), calandrado ($e = 0,164$) e estampado.



Fonte: Produzido pela Autora

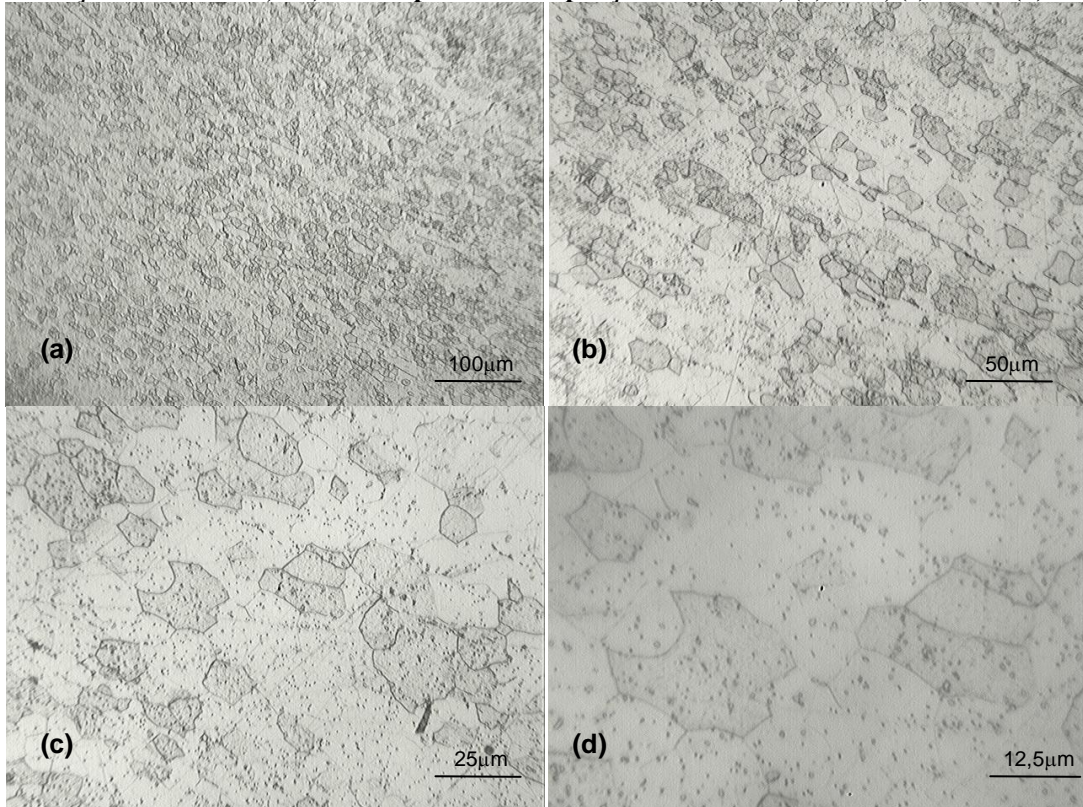
Diante do exposto, o fato do material ter sofrido maior quantidade de deformação plástica, essa condição intensificou os efeitos provocados pela anisotropia e pela orientação cristalográfica do aço AISI 430.

No ambiente industrial este problema é reduzido com o controle do teor de nióbio nas ligas dos aços inoxidáveis ferríticos.

A mudança da quantidade de deformação plástica em tração ($e = 0,019$ para $0,012$) e em calandragem ($e = 0,164$ para $0,172$) totalizando deformação convencional total de $0,184$ não ocasionou mudança no aspecto microestrutural do aço AISI 430, figura 5.25, além da

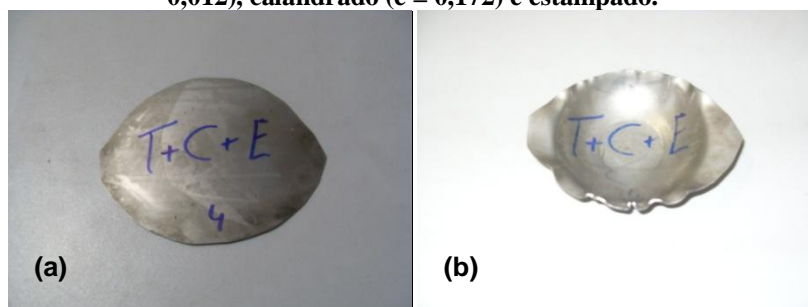
orientação dos grãos. Com relação ao aspecto macroscópico, nota-se, assim como observado na figura 5.24(b), a presença acentuada do fenômeno de “orelhamento”, figura 5.26(b).

Figura 5.25 - Fotomicrografias do aço AISI 430 tracionado ($e = 0,012$, amostra 4), calandrado ($e = 0,172$, deformação total de $e = 0,184$) e estampado com ampliação de: a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.



Fonte: Produzido pela Autora

Figura 5.26 - Amostras do AISI 430: a) tracionado ($e = 0,012$) e calandrado ($e = 0,172$) e b) tracionado ($e = 0,012$), calandrado ($e = 0,172$) e estampado.



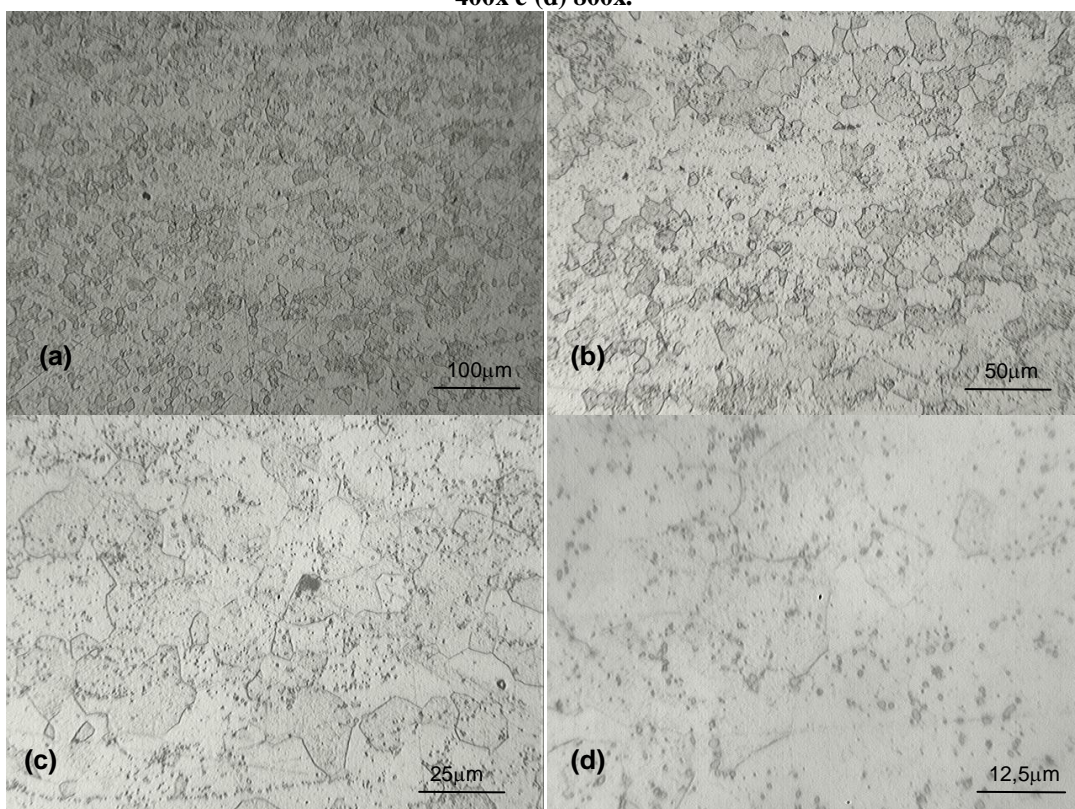
Fonte: Produzido pela Autora

A redução da quantidade de deformação plástica em tração ($e = 0,012$ contra $0,019$) pode ter levado à não ocorrência de estrias nesta condição.

A execução do tratamento térmico anterior ao processamento mecânico combinado do aço AISI 430 promoveu apenas um ligeiro aumento do tamanho de grão deste material quando se compara as figuras 5.27(a) e 5.25(a).

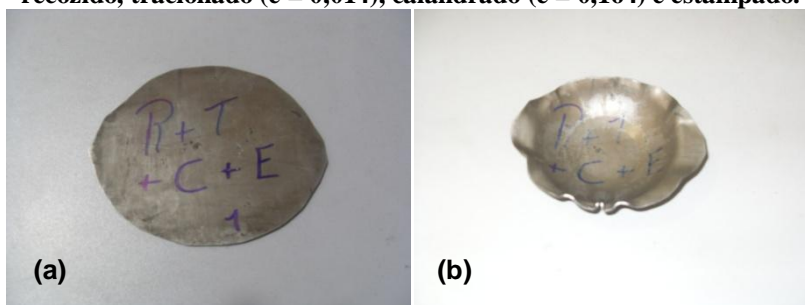
Ao contrário do observado para as rotas envolvendo os esforços de tração e de calandragem antes da operação de estampagem, o tratamento térmico de recozimento anterior à aplicação desses esforços mecânicos não intensificou a formação do “orelhamento” do aço AISI 430, mantendo tão intenso quanto na condição sem a aplicação deste tratamento térmico, figura 5.28(b).

Figura 5.27 - Fotomicrografias do aço AISI 430 recozido, tracionado ($e = 0,014$, amostra 2), calandrado ($e = 0,164$, deformação convencional total de $0,178$) e estampado com ampliação de: a) 100x, (b) 200x, (c) 400x e (d) 800x.



Fonte: Produzido pela Autora

Figura 5.28 - Amostras do AISI 430: a) recozido, tracionado ($e = 0,014$) e calandrado ($e = 0,164$) e b) recozido, tracionado ($e = 0,014$), calandrado ($e = 0,164$) e estampado.



Fonte: Produzido pela Autora

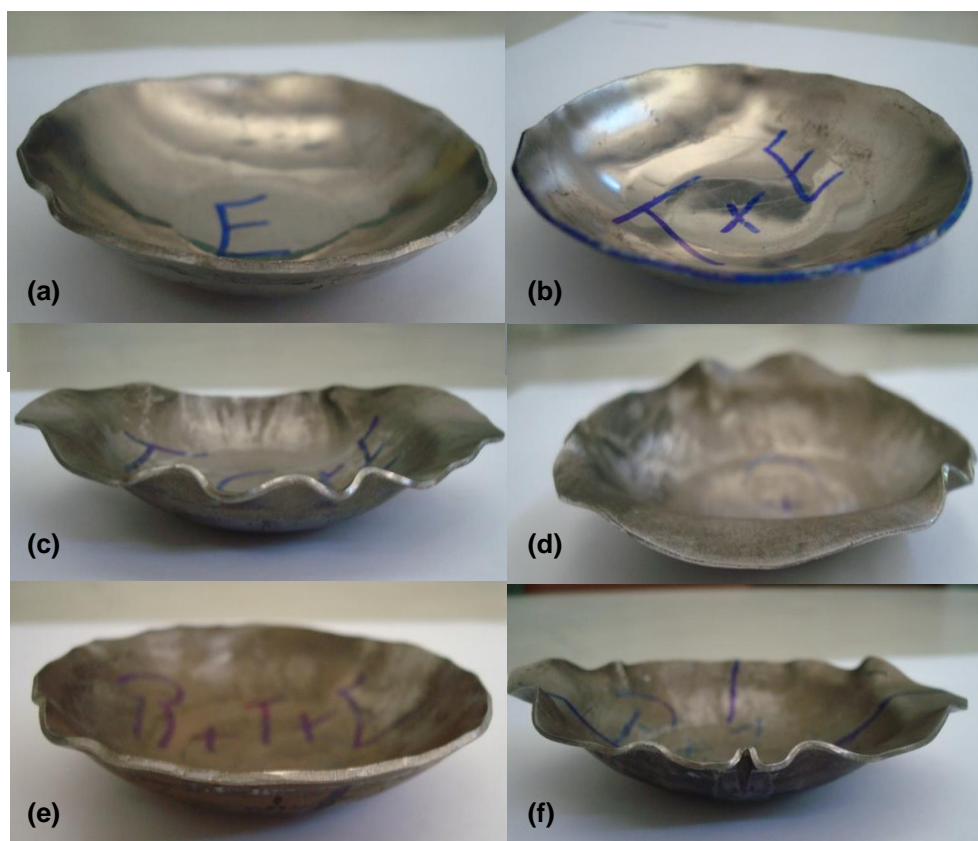
5.4 Distribuição da deformação

A figura 5.29 abaixo mostra a diferença na distribuição da deformação nos copos embutidos pelas diversas rotas. Pode-se notar que quanto maior o esforço sofrido, maior a variação na espessura ao longo do copo.

Nos copos que foram calandrados (figura 5.29 (c), 5.29 (d) e 5.29 (f)) percebe-se o aumento da presença de orelhamento e uma redução da espessura um pouco mais acentuada das abas, pois as regiões que sofrem maior deformação tendem ao afinamento.

Em todos os copos embutidos houve ausência de trincas; e em alguns casos, os fundos dos copos ficaram mais planos. Estas diferenças se dão devido ao efeito da combinação do modo de deformação.

Figura 5.29 - Distribuição da deformação nos copos embutidos, pelas rotas: a) estampado, b) tracionado e estampado, c) tracionado, calandrado e estampado, d) recozido, calandrado e estampado, e) recozido, tracionado e estampado e f) recozido, tracionado, calandrado e estampado.



Fonte: Produzido pela Autora

6 CONCLUSÕES

A estampagem de um copo simples para o aço AISI 430 A em várias condições de processamento, envolvendo desde o estado inicial até a condição de processamento combinado indicaram:

- a) arranjo microestrutural semelhante em todos os casos estudados;
- b) a tendência de orientação cristalográfica com a aplicação do esforço mecânico de tração e calandragem;
- c) a formação do fenômeno de “orelhamento” para as rotas de processamento que fizeram uso do esforço de calandragem, com ou sem a condução de tratamento térmico de recozimento anterior ao processamento mecânico de tração e de calandragem;
- d) a ausência de trincas após a estampagem do aço AISI 430 para todas as condições de processamento investigadas neste trabalho;
- e) a tendência para o aumento da imperfeição superficial “orelhamento” com a condução do tratamento térmico de recozimento anterior à aplicação dos esforços de tração e de calandragem nas rotas tração/estampagem e calandragem/estampagem;
- f) a tendência para o desenvolvimento de estrias de estampagem para o material tracionado, calandrado e estampado.

7 REFERÊNCIAS

ACESITA. **Aços inoxidáveis**. Catálogos Arcelor Mittal, 2006.

ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook: Forming and forging**. 1998. V. 14. p. 1263 – 1316.

BRESCIANI, E. **Conformação plástica dos metais**. 6. ed. São Paulo: EPUSP, 2011. 258 p.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CÂNDIDO, F. S. **Origens do estriamento de estampagem dos aços inoxidáveis ferríticos tipo AISI 430**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2003.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª edição. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 652 p.

COSTA, H. S. **Fabricação de biocerâmicas de matriz porosa com estrutura em alumina, recobrimento superficial de fosfato de cálcio e zinco incorporado à superfície**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2006.

FERREIRA, B. **Introdução a manufatura mecânica**. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/pmr/lefa/download/PMR2202-Estampagem.pdf>>. Acesso em: 06 de dezembro de 2011.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Conformação mecânica II: extrusão, trefilação e conformação de chapas**. Disponível em: <http://www.norbertocefetsc.pro.br/pfb_conformacaoii.pdf>. Acesso em: 11 de outubro de 2011.

OLIVEIRA, T.R., CUNHA, M.A., GONÇALVES, I.N. **Estriamento (*roping*) em aços inoxidáveis ferrítico AISI 430 estabilizados ao nióbio**. *Tecnol. Metal. Mater.*, v. 5, n 3, p. 150-155, 2009.

SCHAEFFER, L. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 200 p.

USP. **Microscopia ótica e eletrônica**. Disponível em: <<http://fap.if.usp.br/~lff/mo.html>>. Acesso em: 06 de dezembro de 2011.