

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

THATIANE MARTINS DA SILVA BATISTA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO AISI 409 APÓS UMA
OPERAÇÃO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA**

BELO HORIZONTE

2015

THATIANE MARTINS DA SILVA BATISTA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO AISI 409 APÓS UMA
OPERAÇÃO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA**

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 de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Wellington Lopes
Coorientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa

BELO HORIZONTE

2015

THATIANE MARTINS DA SILVA BATISTA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO AISI 409 APÓS UMA
OPERAÇÃO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA**

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 de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 06 de julho de 2015

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Wellington Lopes – Orientador

Prof.^a Dra. Elaine Carballo Siqueira Côrrea – Coorientadora

Prof.^a M.Sc. Luciana Boaventura Palhares

Prof. Dr. Franco de Castro Bubani

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de realização deste trabalho e por ter me dado forças para seguir em frente e superar todas as dificuldades.

Ao professor Wellington, por toda dedicação, pela orientação, pela compreensão e pela simpatia, sempre presentes ao longo da execução deste trabalho.

À professora Elaine, pelo auxílio em momentos decisivos.

Ao departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG e ao departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, por me proporcionarem a estrutura necessária para realização deste trabalho.

Aos meus pais e irmã, pelo constante incentivo e apoio incondicionais.

Aos meus amigos, pela torcida.

E a todos os demais que fizeram parte desta importante etapa e tornaram a concretização deste trabalho possível.

“O sucesso nasce do querer. Sempre que o homem aplicar a determinação e a persistência para um objetivo, ele vencerá os obstáculos e, se não atingir o alvo, pelo menos fará coisas admiráveis”. (José de Alencar)

RESUMO

A estampagem profunda é uma das operações mais importantes de conformação de chapas, representando um processo em que se nota a combinação de diferentes modos de deformação plástica, como por exemplo, tração, cisalhamento e compressão. A estampabilidade, uma característica do material, relaciona a capacidade do material de adquirir o formato da matriz sem apresentar defeitos superficiais ou trincas, sendo essa característica influenciada por parâmetros de processo e pelas propriedades mecânicas do material. Considerando essa abordagem, este trabalho apresenta o estudo do comportamento mecânico aço inoxidável ferrítico AISI 409 que foi estampado, com um e dois golpes, em formato de um copo (sem o uso de prensa-chapas) na condição como recebido (entregue na condição recozido) e recozido em laboratório. Para análise do material fez-se a retirada de amostras localizadas no fundo deste copo para realização do ensaio de cisalhamento planar simples e posterior realização do ensaio de microdureza Vickers, para ambos os estados iniciais do material. Os resultados indicaram o endurecimento do material para a estampagem feita sob dois golpes em relação a estampagem feita sob um golpe e também o endurecimento para o estado como recozido devido à redução do tamanho de grão do material tratado termicamente em laboratório.

Palavras-chave: Estampagem. Aço inoxidável. Ensaio de cisalhamento planar simples.

ABSTRACT

Deep drawing is one of the most important sheet metal forming operation, representing a process in which is noticed the combination of different plastic strain ways, for instance: tensile, shearing and compression. The drawability, a characteristic of the material, relates the sheet ability to acquire the die shape without cracks on its surface. This characteristic is influenced by process parameters and by material mechanical properties. Considering this approach, this paper presents the study of the mechanical behavior of AISI 409 ferritic stainless steel which was submitted to a deep drawing process, with one blow and two blows, to acquire a cup shape (without using the blank holder). The deep drawing was made in two material conditions: as received (delivered at annealing condition) and annealed in lab. To analyze this material, samples were taken from the bottom of the cup, for the simple shear test realization and then the realization of Vickers microhardness test, for both initial conditions of the material. The results indicated that the deep drawing made with two blows presents a larger hardening in comparison with the deep drawing made with one blow. The results also indicate hardening for the annealing state due to the grain size reduction for the heat-treated material.

Keywords: Deep drawing. Stainless steel. Simple shear test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Efeito do cromo na resistência a corrosão dos aços.	18
Figura 2 – Diagrama de equilíbrio de fases Fe-Cr, no qual são observadas as fases líquida e sólidas.	21
Figura 3 – Mudanças de propriedades significativas causadas devido à recuperação, recristalização e crescimento de grão.	24
Figura 4 – Principais operações de estampagem.	27
Figura 5 – Desenho esquemático de uma estampagem profunda de um copo cilíndrico.	28
Figura 6 – Etapas do processo de embutimento ou estampagem profunda.	29
Figura 7 – Tipos de deformações que ocorrem na estampagem profunda.	30
Figura 8 – Representação esquemática da deformação devida a estampagem profunda.	31
Figura 9 – Copo cilíndrico estampado sem aba (flange).	33
Figura 10 – Efeito do raio da matriz na força do punção necessária para promover a estampagem de vários diâmetros de um blank de 1mm de espessura da liga C27400.	34
Figura 11 – O processo de laminação como origem da anisotropia.	37
Figura 12 – Copo cilíndrico estampado com orelhamento.	38
Figura 13 – Encruamento representado em uma curva típica tensão-deformação.	39
Figura 14 – Representação esquemática do efeito do encruamento em algumas propriedades mecânicas dos metais.	40
Figura 15 – Esquema descritivo do ensaio de cisalhamento planar simples.	41
Figura 16 – Equipamento projetado para o ensaio de cisalhamento planar simples.	42
Figura 17 – Esquema representativo da impressão deixada pelo método de dureza Vickers. .	43
Figura 18 – Equipamento utilizado para análise química do aço inoxidável ferrítico AISI 409.	44
Figura 19 – Fluxograma do procedimento experimental realizado.	46
Figura 20 – Guilhotina U-136-D utilizada para corte das amostras.	47
Figura 21 – Microscópio óptico utilizado para análise microestrutural.	48
Figura 22 – Difratorômetro utilizado para análise de Difração de Raios-X.	48
Figura 23 – Microdurômetro digital utilizado para realização dos testes.	49
Figura 24 – Forno elétrico da marca Magnus utilizado na realização do tratamento térmico. .	50
Figura 25 – Guilhotina Newton utilizada para corte das chapas.	50
Figura 26 – Modelo utilizado para confecção dos corpos de prova utilizados para estampagem.	51

Figura 27 – <i>Cut off</i> utilizado para confecção dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento planar simples.....	52
Figura 28 – Marcação dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento planar simples no fundo dos copos estampados.	52
Figura 29 – Corte do corpo de prova obtido para o ensaio de cisalhamento planar simples. ..	53
Figura 30 – Corpo de prova utilizado para o ensaio de microdureza Vickers.....	53
Figura 31 – Prensa mecânica Gutmann utilizada para confecção dos copos estampados.....	54
Figura 32 – Punção utilizado para confecção dos copos estampados.	54
Figura 33 – Matriz utilizada para confecção dos copos estampados.....	55
Figura 34 – Conjunto matriz e punção utilizados para confecção dos copos estampados.	55
Figura 35 – Posicionamento das chapas para posterior estampagem.....	55
Figura 36 – Máquina de ensaios universais Instron 5582 com a garra de cisalhamento adaptada.	56
Figura 37 – Corpo de prova do ensaio de cisalhamento planar simples já preso a garra de cisalhamento.	57
Figura 38 – Micrografias do aço inoxidável AISI 409 – microscópio óptico.	59
Figura 39 – Difratoograma do aço inoxidável AISI 409.	60
Figura 40 – Junção dos difratogramas obtidos para o aço inoxidável AISI 409.....	61
Figura 41 – Resultado da estampagem de <i>blanks</i> do aço inoxidável AISI 409.....	63
Figura 42 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 estampado com um golpe.	64
Figura 43 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 estampado com dois golpes.	64
Figura 44 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 estampado e sem tratamento térmico.....	65
Figura 45 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 estampado e tratado termicamente.	66
Figura 46 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 não estampado.	66
Figura 47 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 não tratado termicamente.....	67
Figura 48 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 não tratado termicamente.....	68

Figura 49 – Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 409 – todas as condições de deformação plástica.....70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável ferrítico AISI 409 (% em peso).	44
Tabela 2 – Composição química do aço inoxidável ferrítico AISI 409 (% em peso) disponibilizada no catálogo da Aperam.	45
Tabela 3 – Especificação técnica do aço inoxidável ferrítico AISI 409 (% em peso).	45
Tabela 4 – Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 409 – estado como recebido.	61
Tabela 5 – Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 409 – informações técnicas.	62
Tabela 6 – Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 409 – após tratamento térmico.	62
Tabela 7 – Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 409 – todas as condições de deformação plástica.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ASM – *American Society of Metals*

CCC – estrutura cristalina cúbica de corpo centrado

CFC – estrutura cristalina cúbica de face centrada

DRX – difração de raios-X

F – fator de conversão de Taylor

PH – *Precipitation Hardening*

TCC – estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado

ZTA – zona termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

$(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ ou M_{23}C_6 – composto rico em cromo

{111} – direção cristalográfica

1GNT – estampagem feita com um golpe em material não tratado termicamente

1GTT – estampagem feita com um golpe em material tratado termicamente

2GNT – estampagem feita com dois golpes em material não tratado termicamente

2GTT – estampagem feita com dois golpes em material tratado termicamente

C – carbono

Cr – cromo

d – diâmetro final do copo estampado [mm]

D_b – diâmetro inicial do blank [mm]

D_p – diâmetro do punção [mm]

Fe – ferro

h – altura do copo estampado [mm]

L – comprimento do corpo de prova para cisalhamento [mm]

Mn – manganês

Mo – molibdênio

Nb – nióbio

Ni – níquel

P – carga [N]

$P_{\text{prensa-chapa}}$ – pressão exercida pelo prensa-chapa [MPa]

\bar{R} – coeficiente de anisotropia médio (coeficiente de Lankford)

R_{0° – fator de anisotropia medido a 0° da direção de laminação

R_{45° – fator de anisotropia medido a 45° da direção de laminação

R_{90° – fator de anisotropia medido a 90° da direção de laminação

Si – silício

t – espessura do corpo de prova para cisalhamento [mm]

t_0 – espessura inicial do blank [mm]

Ta – tântalo

Ti – titânio

TiC – carbeto de titânio

w_{efetiva} – largura efetiva do corpo de prova para cisalhamento [mm]

Z – altura da orelha em um copo estampado [mm]

α – ferrita

α' – ferrita rica em cromo

β – relação de embutimento

γ – austenita

ΔG – energia livre [J]

ΔR – coeficiente de anisotropia planar

Δx – deslocamento relativo das duas garras de cisalhamento [mm]

ε – deformação

$\dot{\varepsilon}$ – taxa de deformação

$\varepsilon_1 = \varepsilon_r$ – deformação na direção longitudinal da peça (deformação radial)

$\varepsilon_2 = \varepsilon_n$ – deformação na direção normal a peça

$\varepsilon_3 = \varepsilon_c$ – deformação na direção transversal da peça (deformação circunferencial)

$\varepsilon_{\text{cisalhante}}$ – deformação cisalhante

$\varepsilon_{\text{extensômetro}}$ – deformação extensômetro

σ – fase sigma

σ – tensão [MPa]

σ_0 – tensão limite de elasticidade [MPa]

$\sigma_1 = \sigma_r$ – tensão na direção longitudinal da peça (tensão radial) [MPa]

$\sigma_2 = \sigma_n$ – tensão na direção normal a peça [MPa]

$\sigma_3 = \sigma_c$ – tensão na direção transversal da peça (tensão circunferencial) [MPa]

$\sigma_{\text{cisalhante}}$ – tensão cisalhante [MPa]

σ_u – tensão limite de resistência a tração do material [MPa]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVOS.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	AÇOS INOXIDÁVEIS	18
3.1.1	Características Gerais	18
3.1.2	Tipos de aços inoxidáveis.....	20
3.1.2.1.	Aços inoxidáveis austeníticos	20
3.1.2.2.	Aços inoxidáveis martensíticos.....	20
3.1.2.3.	Aços inoxidáveis dúplex	20
3.1.2.4.	Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação	21
3.1.2.5.	Aços inoxidáveis ferríticos.....	21
3.2	TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO.....	23
3.3	CONFORMAÇÃO MECÂNICA.....	25
3.3.1	Estampagem	26
3.4	ESTAMPAGEM PROFUNDA	28
3.4.1	Análise das tensões durante a estampagem profunda.....	29
3.4.2	Variáveis da operação de estampagem profunda	32
3.4.2.1.	Variáveis de processo.....	32
3.4.2.1.1.	Forma e dimensão da peça.....	32
3.4.2.1.2.	Determinação da dimensão inicial do blank	33
3.4.2.1.3.	Espessura inicial do <i>blank</i>	33
3.4.2.1.4.	Forma e dimensão das ferramentas.....	33
3.4.2.1.5.	Efeito dos raios do punção e da matriz	34
3.4.2.1.6.	Força do prensa-chapa e relação de embutimento	35
3.4.2.1.7.	Tipo de prensa e velocidade de prensagem.....	36
3.4.2.1.8.	Lubrificação e atrito.....	36
3.4.2.2.	Variáveis metalúrgicas ou do material	36
3.5	ENCRUAMENTO	39
3.6	ENSAIOS MECÂNICOS.....	40
3.6.1	Ensaio de Cisalhamento Planar Simples	40
3.6.2	Ensaio de microdureza Vickers	42

4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1	Material.....	44
4.2	Procedimento Experimental	45
4.3	Caracterização do material	46
4.3.1	Caracterização estrutural	46
4.3.2	Caracterização Mecânica.....	49
4.4	Tratamento Térmico	49
4.5	Corpos de prova.....	50
4.5.1	Corpos de prova para estampagem.....	50
4.5.2	Corpos de prova para o ensaio de Cisalhamento Planar Simples.....	51
4.5.3	Corpos de prova para o ensaio de Microdureza Vickers.....	53
4.6	Estampagem	54
4.7	Ensaio mecânicos.....	56
4.7.1	Ensaio de Cisalhamento Planar Simples	56
4.7.2	Ensaio de Microdureza Vickers.....	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	Caracterização do material	59
5.1.1	Caracterização estrutural	59
5.1.2	Caracterização mecânica	61
5.2	Estampagem	62
5.3	Ensaio mecânicos.....	63
5.3.1	Cisalhamento Planar Simples	63
5.3.2	Microdureza Vickers	69
6	CONCLUSÃO.....	71
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1 INTRODUÇÃO

A estampagem compreende uma série de operações, tipicamente conduzidas a frio, responsáveis pela transformação de chapas, sendo caracterizada pela deformação permanente destas de modo a adquirirem uma nova forma geométrica (CHIAVERINI, 1986a).

As operações básicas de estampagem podem ser executadas separadamente ou em sequência, sendo as principais o corte, o dobramento, o estiramento e a estampagem profunda, operações estas, que são bastante utilizadas na fabricação de diversas peças e componentes, por exemplo, no setor automotivo e aeroespacial (FARIA, 2006).

Durante o processo de conformação mecânica de estampagem profunda há uma combinação de diferentes tipos de esforços mecânicos os quais influenciam diretamente a qualidade final do produto. Diferentes tipos de aços estão disponíveis no mercado e são utilizados para fabricação de chapas metálicas para operações de estampagem. Contudo, o aço inoxidável pode ser citado como um dos aços mais conhecidos e utilizados na confecção de tais chapas.

Como tem-se notado uma busca cada vez maior, em todos os setores industriais, por qualidade e redução de custos de processo, é importante conhecer o comportamento mecânico, os parâmetros de processo e as propriedades do material, visando a obtenção de informações que possam indicar se o processo de estampagem será bem executado. Deste modo, através da realização de ensaios mecânicos é possível conhecer o comportamento mecânico e muitas das propriedades de interesse para fabricação de um determinado produto e seu respectivo processo de manufatura.

Diante desse contexto, este trabalho apresenta o estudo do comportamento mecânico do aço inoxidável ferrítico AISI 409 após a execução de uma operação de estampagem profunda, caracterizando-o, mediante ensaios mecânicos, na região do fundo do copo de modo a investigar a evolução do comportamento mecânico em função dos estados iniciais deste material (como recebido) e recozido em laboratório.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é o estudo do comportamento mecânico do aço inoxidável ferrítico AISI 409 após uma operação de estampagem profunda, tanto no estado como recebido quanto após tratamento térmico de recozimento realizado em laboratório. Para tal, a avaliação do comportamento mecânico será feita através do ensaio de cisalhamento planar simples e do ensaio de microdureza Vickers, comparando os dados obtidos com corpos de prova não estampados.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Investigar o comportamento mecânico macroscópico do aço inoxidável ferrítico AISI 409 por meio do levantamento das curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante;
e
- b) Avaliar a evolução da dureza em função do estado inicial do material (como recebido e recozido) e após a estampagem.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

3.1.1 Características Gerais

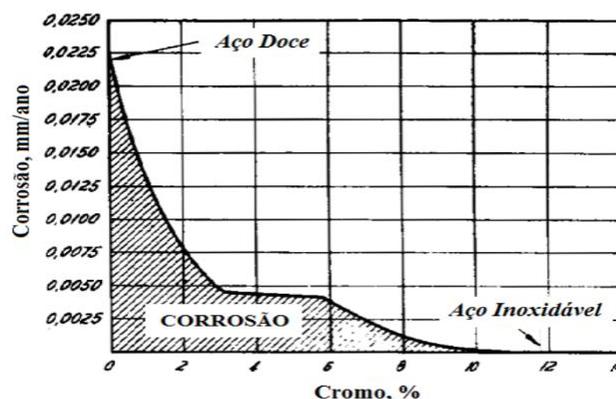
Os aços inoxidáveis são ligas de ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr), que apresentam um teor mínimo de 10,50% de cromo. Outros elementos metálicos também podem estar presentes nestas ligas, tais como o níquel (Ni) e o molibdênio (Mo), porém o cromo é considerado o elemento de liga mais importante presente nestes aços, pois sua adição é a grande responsável pela elevada resistência à corrosão e a oxidação destes (CARBÓ, 2001).

Principalmente devido às propriedades citadas acima e por apresentarem também excelentes propriedades mecânicas, inclusive em temperaturas elevadas, os aços inoxidáveis se tornaram de grande importância para a engenharia, que procura constantemente aperfeiçoar e desenvolver novas ligas que apresentem um melhor desempenho (COLPAERT, 2008).

Segundo Chiaverini (2008), a resistência à corrosão está associada basicamente à presença do cromo, em uma quantidade mínima de 10% em peso, pois a presença deste elemento possibilita a formação de uma película superficial contínua de óxido de cromo que, de acordo com Carbó (2001), apresenta espessura aproximada de 30 a 50 angstroms, que ao se interpor entre o material e o meio, evita que este exerça sua ação corrosiva.

A figura 1 ilustra o efeito do cromo na resistência do aço à corrosão, na qual, observa-se que considerando uma exposição de 10 anos em uma atmosfera industrial, à medida que o teor de cromo do aço aumenta, ele passa de um metal de grande corrosibilidade para um metal praticamente indestrutível pela corrosão (CHIAVERINI, 2008).

Figura 1 – Efeito do cromo na resistência a corrosão dos aços.



Fonte: CHIAVERINI, 2008.

Chiaverini (2008) também cita que a passividade dos aços inoxidáveis depende, de outros fatores além do teor de cromo, tais como:

- a) *Composição química*: outros elementos podem também afetar a resistência a corrosão do aço. O níquel, por exemplo, juntamente com o cromo proporciona a melhor resistência a corrosão de aços inoxidáveis.
- b) *Condições de oxidação*: a atmosfera pode ser oxidante ou redutora e isso influencia na aplicabilidade do aço. Em meios oxidantes os aços inoxidáveis apresentam grande resistência ao ataque corrosivo. Já em meios redutores, como no caso do ácido clorídrico, o aço inoxidável perde toda sua utilidade.
- c) *Susceptibilidade à corrosão localizada*: os aços inoxidáveis são susceptíveis a este tipo de corrosão, que é frequentemente mais prejudicial do que a corrosão generalizada. A corrosão localizada ou *pitting* ocorre devido à ação do íon negativo de cloro em soluções aquosas. Adições de elementos de liga, como o molibdênio (Mo), evitam esse tipo de corrosão.
- d) *Susceptibilidade à corrosão intergranular*: esse tipo de corrosão pode ocorrer em aços inoxidáveis austeníticos, quando estes são tratados termicamente ou aquecidos para o trabalho a quente em uma certa faixa de temperaturas (entre 400-900°C). Nesta faixa ocorre precipitação de carbonetos ricos em cromo nos contornos de grão e o empobrecimento das regiões adjacentes, o que aumenta a susceptibilidade à corrosão. Para combater este fenômeno pode-se empregar algumas técnicas, tais como: o reaquecimento do aço a temperaturas entre 950-1150°C, para se obter uma redissolução dos carbonetos existentes no contorno de grão; a redução do teor de carbono do aço, o que torna ineficaz a formação de carbonetos; e também a adição de outros elementos de liga como titânio (Ti), tântalo (Ta) ou nióbio (Nb).

Tendo em vista a composição química e o tratamento térmico empregado, diferentes microestruturas podem ser produzidas nos aços inoxidáveis e, como a microestrutura tem efeito dominante sobre as propriedades destes aços, estes são classificados com base neste fator, a temperatura ambiente, em cinco grupos: austeníticos, martensíticos, dúplex, endurecíveis por precipitação e ferríticos (COLPAERT, 2008). A descrição das principais características dos grupos de aços inoxidáveis mencionados é feita no próximo tópico, no qual é destacado o aço inoxidável ferrítico, objeto de estudo do presente trabalho.

3.1.2 Tipos de aços inoxidáveis

Como mencionado anteriormente, os aços inoxidáveis são classificados por Colpaert (2008) em cinco categorias: austeníticos, martensíticos, dúplex, endurecíveis por precipitação e ferríticos, que são detalhados no presente tópico.

3.1.2.1. Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são assim chamados por terem a capacidade de reter, à temperatura ambiente, uma estrutura completamente austenítica, cúbica de face centrada (CFC), estabilizada à temperatura ambiente graças a adição de níquel e outros estabilizantes, tais como o manganês (Mn) (COLPAERT, 2008). Estes aços são os mais comuns entre os aços inoxidáveis e apresentam em torno de 18,0% de cromo e 8,0% de níquel. São caracterizados por apresentar boa resistência a corrosão, elevada tenacidade e boa soldabilidade (SILVA e MEI, 2010).

Os principais aços inoxidáveis austeníticos são: AISI 304, AISI 310, AISI 316 e AISI 321.

3.1.2.2. Aços inoxidáveis martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos, de acordo com Chiaverini (2008), são ligas metálicas que apresentam teores de cromo entre 11,5% e 18,0%, e que apresentam carbono em uma determinada concentração, cerca de 0,1%, que permite a realização do tratamento térmico de têmpera e revenimento, para obtenção da fase martensítica como constituinte principal, cuja estrutura cristalina é a tetragonal de corpo centrado (TCC).

Os principais aços inoxidáveis martensíticos são: AISI 403, AISI 410, AISI 420 e AISI 440A, AISI 440B e AISI 440C.

3.1.2.3. Aços inoxidáveis dúplex

Aços inoxidáveis dúplex ferrítico-austeníticos, segundo Silva e Mei (2010), são aqueles que apresentam microestruturas que consistem em frações aproximadamente iguais dessas duas fases. Estes aços são caracterizados por apresentar uma combinação favorável das propriedades dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, por isso o balanceamento entre as frações volumétricas de austenita (γ) e ferrita (α) deve estar próximo de 50% para cada uma das fases, a fim de se maximizar as propriedades mecânicas. As principais propriedades deste aço são:

elevada resistência mecânica, boa tenacidade e resistência a corrosão boa em diversos meios, incluindo resistência a corrosão sob tensão.

Os principais aços inoxidáveis dúplex são: AISI 329, 2304, 2205 e 2507.

3.1.2.4. Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação

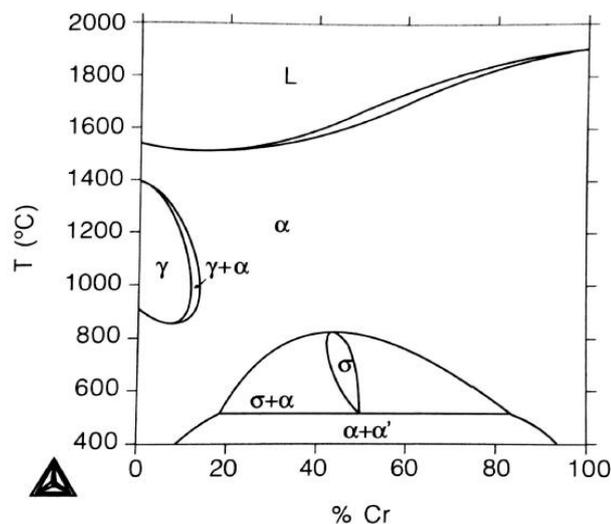
Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são aqueles que se caracterizam por apresentarem suas propriedades mecânicas melhoradas graças ao tratamento térmico de envelhecimento (SILVA e MEI, 2010). Embora apresentem custos mais elevados do que os aços inoxidáveis normais, os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são utilizados em componentes críticos do campo industrial, devido à alta resistência que podem adquirir (CHIAVERINI, 2008).

Os principais aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são: 17-4PH, 17-7PH e 15-7PH.

3.1.2.5. Aços inoxidáveis ferríticos

Classicamente, os aços inoxidáveis ferríticos são aqueles que apresentam estrutura ferrítica cúbica de corpo centrado (CCC) em todas temperaturas, ou seja, aços cuja composição situa-se a direita do campo austenítico no diagrama Fe-Cr, que pode ser visualizado na figura 2 (CHIAVERINI, 2008).

Figura 2 – Diagrama de equilíbrio de fases Fe-Cr, no qual são observadas as fases líquida e sólidas.



Fonte: SILVA e MEI, 2010.

Porém, na figura 2 é visto que para baixos teores de cromo há um campo de fase austenita (γ) e em teores intermediários de cromo (15 - 70%) em baixas temperaturas (550 - 850°C) há uma

fase dura, frágil e tetragonal conhecida como fase sigma (σ) (NOONING, 2002). Dessa forma, segundo Colpaert (2008), a maioria dos aços inoxidáveis ferríticos não atende a essa definição. Por exemplo, o aço inoxidável ferrítico AISI 430 (17% de cromo) pode apresentar de 30% a 50% de austenita se este for aquecido acima de 800°C e, durante o resfriamento, a austenita se transformará em martensita de forma que a estrutura final seja de ferrita e martensita.

Dessa maneira, os aços inoxidáveis ferríticos, em geral, são comercializados após o tratamento térmico de recozimento para alívio de tensões, no qual há decomposição da martensita presente na estrutura em ferrita e de carbonetos, proporcionando a obtenção de uma microestrutura essencialmente ferrítica (SILVA e MEI, 2010).

Os aços inoxidáveis ferríticos são ferromagnéticos e apresentam como principal elemento de liga o cromo, cujo teor varia de 10,5% a 30%, cujo teor de carbono é baixo (máximo 0,20%), podendo haver eventuais adições de molibdênio, silício, alumínio, nióbio ou titânio a fim de conferir propriedades específicas ao aço (ASM HANDBOOK, 1993a).

Um fator importante a ser levado em consideração é de que devido ao alto teor de cromo presente neste aço, pode ocorrer precipitação de carbonetos de cromo, que pode ser nociva e motivo principal para ocorrência de três mecanismos de fragilização dos aços inoxidáveis ferríticos (ASM HANDBOOK, 1992):

- *Fragilização por precipitação de fase sigma (σ):* a fase sigma é difícil de ser formada em ligas com teores menores que 20% de cromo, mas é facilmente formada em aços com 25 a 30% de cromo, quando estes estão aquecidos entre 500°C e 800°C. A presença de fase sigma também é induzida pela presença de molibdênio, silício, níquel e manganês, visto que estes elementos estabilizam esta fase. A fragilização por precipitação de fase sigma provoca a diminuição da ductilidade e da tenacidade abaixo de 600°C.
- *Fragilização a 475°C:* os aços inoxidáveis ferríticos estão susceptíveis a fragilização quando aquecidos entre 400°C e 500°C. A fragilização é causada pela precipitação de ferrita rica em cromo (α') e é evidenciada quanto maior for o tempo, a temperatura do tratamento térmico e a porcentagem de cromo no aço. Este tipo de fragilização pode ser removido pelo aquecimento em temperaturas maiores que 550°C.

- *Fragilização a altas temperaturas:* ocorre em aços com altos teores de carbono e/ou nitrogênio intersticiais aquecidos em temperaturas acima de 950°C e resfriados ao ar até a temperatura ambiente, resultando em fragilização e perda da resistência a corrosão. Este tipo de fragilização é também chamado de sensitização, em que ocorre a precipitação de carbonetos de cromo, preferencialmente nos contornos de grão. Métodos para evitar este tipo de fragilização são: aquecimento entre 700°C e 950°C do aço, permitindo que o cromo se difunda nas áreas empobrecidas; redução do teor de nitrogênio e carbono intersticiais; ou adição de elementos de liga estabilizadores de ferrita (formadores de carbonetos), tais como titânio e nióbio.

Devido à ausência ou adição mínima de níquel, os aços inoxidáveis ferríticos são mais baratos do que os aços inoxidáveis austeníticos. Além disso, apresentam vantagens, por exemplo, em relação à corrosão sob tensão, pois o modo de deformação na estrutura CCC é cruzado, diferente da estrutura CFC que é planar, isto é, existem muitos sistemas de deslizamento atuando simultaneamente, o que impede um acúmulo de discordâncias num determinado plano, evitando com isso concentração de tensões. São também resistentes a fadiga térmica devido ao seu baixo coeficiente de expansão térmica (SILVA e MEI, 2010). Os aços inoxidáveis ferríticos também apresentam melhor capacidade de estampagem profunda devido ao componente de textura {111} inerente a microestrutura CCC o que os faz úteis para fabricação de partes de exaustão de automóveis (NOONING, 2002).

No entanto, os aços inoxidáveis ferríticos apresentam baixa resistência ao impacto, baixa soldabilidade, conduzindo ao crescimento da zona termicamente afetada (ZTA), e limitação em aplicações criogênicas, devido a existência da temperatura de transição dúctil-frágil (SILVA e MEI, 2010).

3.2 TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO

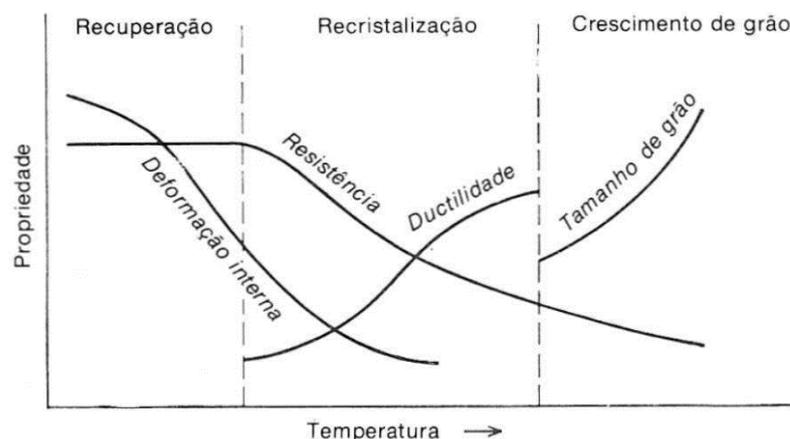
O recozimento pleno é um tratamento térmico realizado em metais em que é feito o aquecimento controlado deste em temperaturas acima da zona crítica (temperatura de recristalização), durante um certo intervalo de tempo, seguido de um resfriamento lento (COLPAERT, 2008).

Segundo Silva e Mei (2010), este tratamento térmico visa facilitar o trabalho a frio do aço, remover tensões, diminuir sua dureza e atingir a microestrutura e propriedades desejadas. Pode-se dizer que, basicamente, o recozimento “apaga” as estruturas resultantes de tratamentos

térmicos ou mecânicos feitos anteriormente no material devido a ocorrência de nucleação e crescimento de novos grãos ao se passar pela zona crítica (COLPAERT, 2008).

O processo de recozimento envolve normalmente três etapas distintas: recuperação, recristalização e crescimento de grão, cujas principais influências podem ser visualizadas na figura 3. Na etapa de recuperação ocorre a restauração das propriedades físicas do material trabalhado a frio, sem que ocorram mudanças significativas na microestrutura do material ou que as propriedades de resistência, controladas pelas discordâncias, sejam afetadas. Já na etapa de recristalização ocorre a diminuição de densidades de discordâncias, eliminando todos os efeitos do encruamento. Assim, na recristalização há substituição da estrutura trabalhada a frio por um novo grupo de grãos livres de deformação, evidenciada por uma diminuição da dureza ou da resistência e um aumento de ductilidade. A continuidade do recozimento leva a etapa de crescimento de grão, em que a estrutura já recristalizada passa a apresentar crescimento de alguns grãos devido a diminuição da energia livre resultante da diminuição da área de contornos de grão (DIETER, 1981).

Figura 3 – Mudanças de propriedades significativas causadas devido à recuperação, recristalização e crescimento de grão.



Fonte: DIETER, 1981.

A recristalização é influenciada por diferentes variáveis, como por exemplo: quantidade de pré-deformação, temperatura, tempo, tamanho de grão inicial, composição e grau de recuperação anterior ao início da recristalização. Por isso, não é definida como uma temperatura fixa, mas sim como uma temperatura em que uma dada liga trabalhada a frio recristaliza-se completamente em uma hora (DIETER, 1981).

Aços inoxidáveis ferríticos são geralmente recozidos com o objetivo principal de se evitar a sensitização do aço e modificar seu endurecimento. Geralmente nestes aços, durante o

recozimento, ocorre a precipitação de $(Fe,Cr)_{23}C_6$ ($M_{23}C_6$) ricos em cromo. Para evitar a ocorrência deste problema, os aços inoxidáveis ferríticos são estabilizados com titânio (Ti) e, assim, ocorre a precipitação de carbono e titânio homoganeamente por toda a matriz como: carbonetos de titânio (TiC). A formação destes carbonetos inibe a precipitação de carbonetos ricos em cromo, devido à maior afinidade do carbono com o titânio quando comparado ao cromo, ou seja, a precipitação de carbonetos de titânio requer menor energia livre (ΔG) para nucleação do que carbonetos de cromo. Isso efetivamente estabiliza o aço contra corrosão intergranular causada pela sensitização (NIEKERK e TOIT, 2011).

O recozimento também proporciona a criação de uma textura desejável com o objetivo de melhorar a estampabilidade do metal (CAVAZOS, GUERRERO-MATA e ZAMBRANO, 2011).

As equações (1) e (2) foram estabelecidos na literatura para a determinação do teor de titânio adequado para estabilização bem-sucedida de aços com 12% de cromo (NIEKERK e TOIT, 2011):

$$\% \text{ Ti} > 4 \times (\% \text{ C} + \% \text{ N}) \quad (1)$$

$$\% \text{ Ti} > 0,08\% + 8 \times (\% \text{ C} + \% \text{ N}) \quad (2)$$

É importante ter alguns cuidados durante o ciclo térmico de recozimento, como: executar o recozimento com um tempo de permanência a temperatura de recozimento adequado para ocorrência da formação e uniformização da fase requerida e realizar o resfriamento pelo menos até uma faixa de temperatura em que se tem certeza de que as transformações estão completas (COLPAERT, 2008).

3.3 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

A conformação mecânica é uma das tecnologias mais antigas relacionada a fabricação de peças metálicas. Segundo Helman e Cetlin (1993, p.1), a conformação mecânica é definida como “uma operação onde se aplicam solicitações mecânicas em metais, que respondem com uma mudança permanente de dimensões”, ou seja, o material metálico de geometria simples, geralmente em forma de bloco ou chapa, é deformado plasticamente entre ferramentas ou matrizes para se obter a configuração desejada, normalmente de geometria complexa, com forma, tamanho, precisão e tolerâncias bem definidas.

Dessa maneira, os processos de conformação mecânica são constituídos de processos de deformação plástica, para os quais as tensões aplicadas são geralmente inferiores ao limite de resistência à ruptura do material (BRESCIANI, 2011).

De acordo com Dieter (1981), fazem parte dos processos de conformação mecânica a laminação, o forjamento, a trefilação, a extrusão e a estampagem.

Tomando como exemplo, a laminação é um processo de conformação que essencialmente consiste na passagem de um corpo sólido entre dois cilindros que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários, tendo como principais produtos chapas, barras, tubos ou perfis (SILVA e MEI, 2010).

Sendo assim, a laminação é o processo de conformação mecânica que produz o material necessário no início de outros processos de conformação mecânica. Por exemplo, as chapas provenientes da laminação são matérias-primas para o processo de estampagem, que modela chapas planas em diferentes formatos. A conformação mecânica por estampagem será abordada com maior ênfase, tendo em vista que é um dos temas deste trabalho.

3.3.1 Estampagem

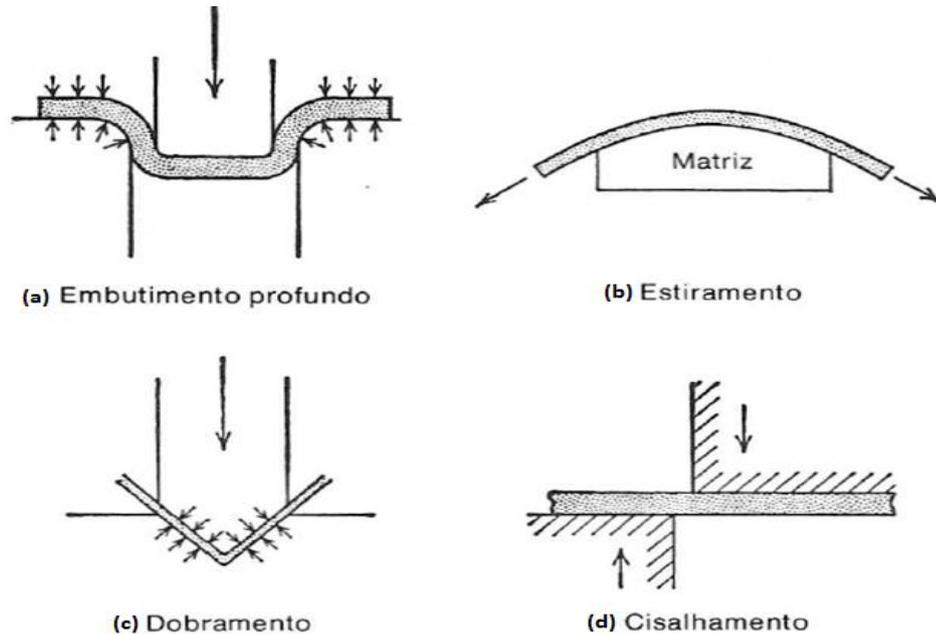
A estampagem é um processo de conformação mecânica que compreende um conjunto de operações, nas quais, sem produzir cavacos, submete-se uma chapa plana a transformações de modo a adquirir uma nova forma geométrica, seja plana ou oca. A deformação plástica é levada a efeito com o emprego de prensas de estampagem, com o auxílio de dispositivos especiais chamados de estampos ou matrizes (CHIAVERINI, 1986a).

As peças obtidas pelo processo de estampagem apresentam formas geométricas complexas e irregulares, porém têm a característica de apresentarem espessura quase uniforme, que pode ser obtida graças à sucessão de operações de estampagem.

Basicamente a estampagem envolve a combinação ou a sequência de execução de operações básicas como o corte ou cisalhamento, o dobramento, o estiramento e a estampagem profunda, ou embutimento, para alcançar a forma desejada do material (DIETER, 1981). As principais operações de estampagem são ilustradas na figura 4.

As operações de estampagem normalmente são efetuadas a frio, porém a estampagem profunda pode eventualmente ser realizada a quente, de acordo com as necessidades técnicas requeridas pelo processo (CHIAVERINI, 1986a).

Figura 4 – Principais operações de estampagem.



(a) Embutimento ou estampagem profunda; (b) Estiramento; (c) Dobramento; e (d) Corte por cisalhamento.

Fonte: DIETER, 1981.

Em casos mais simples, uma única operação pode ser suficiente para se obter a peça final, entretanto, dependendo da profundidade de deformação desejada, pode ser necessária a aplicação de duas ou mais operações de estampagem.

Segundo Ponomarev (2009), devido a suas características, o processo de fabricação por estampagem apresenta vantagens, como: alta produção, baixo custo de peças produzidas e bom acabamento superficial. Porém, a principal desvantagem do processo é o alto custo do ferramental, que é amortizado somente quando a quantidade de peças a produzir é elevada.

As operações de estampagem dependem de diversos fatores, tais como: a forma final da peça a ser obtida e suas dimensões e a qualidade do material da chapa que será trabalhada. A forma final da peça, assim como sua dimensão, impõe o número de operações necessárias para a conformação desta. A qualidade do material também determina o número de operações necessárias, pois está diretamente relacionada a sua conformabilidade (ROSSI, 1979).

Quando a conformabilidade de um material está ligada ao processo de estampagem, dá-se o nome de estampabilidade, que é uma característica do material, relacionada com sua capacidade em adquirir o formato da matriz, sem apresentar defeitos superficiais, estruturais ou de forma (CIMM, 2015).

Uma vez que nas operações de estampagem ocorre uma combinação complexa de tipos de conformação, a estampabilidade torna-se função não somente das propriedades do material, mas também das condições de deformação e dos estados de tensão e de deformação presentes, ou seja, também é influenciada pelos parâmetros do processo (CIMM, 2015).

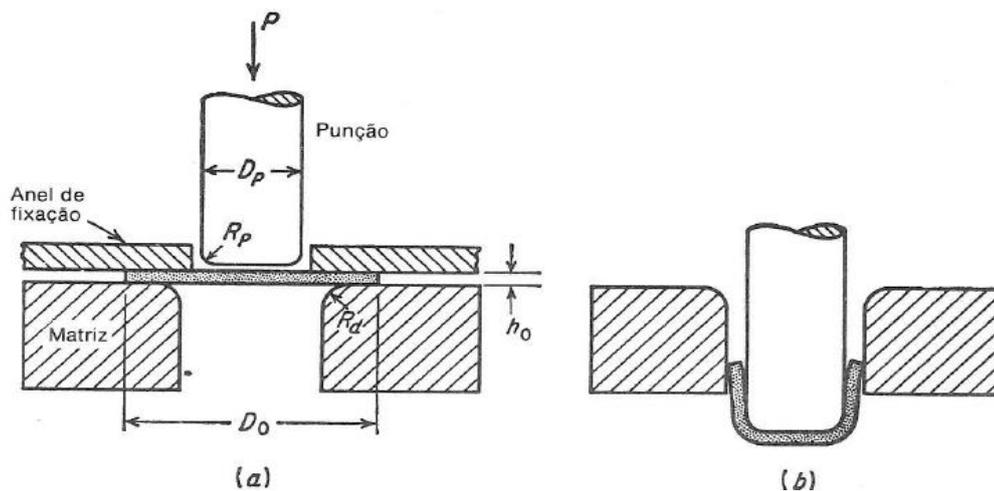
Neste trabalho será feita uma operação de estampagem profunda em chapas de aço AISI 409 de modo a investigar o comportamento mecânico deste aço. Dessa maneira, uma maior ênfase será dada para esta técnica de estampagem.

3.4 ESTAMPAGEM PROFUNDA

A estampagem profunda ou embutimento é o processo de fabricação utilizado para modelar chapas planas em forma de disco, conhecidas como *blanks*, em peças com forma de copo, tais como: banheiras, pias e para-lamas de automóveis (DIETER, 1981).

A operação consiste em deformar o *blank* de tamanho adequado através da ação de um punção, que empurra o *blank* em direção da cavidade da matriz, como visto na figura 5. É possível observar nesta mesma figura 5 os três componentes principais de uma operação de estampagem profunda: a matriz, o punção, e o prensa-chapas, também denominado sujeitador ou anel de fixação (SARDINHA, 2012).

Figura 5 – Desenho esquemático de uma estampagem profunda de um copo cilíndrico.



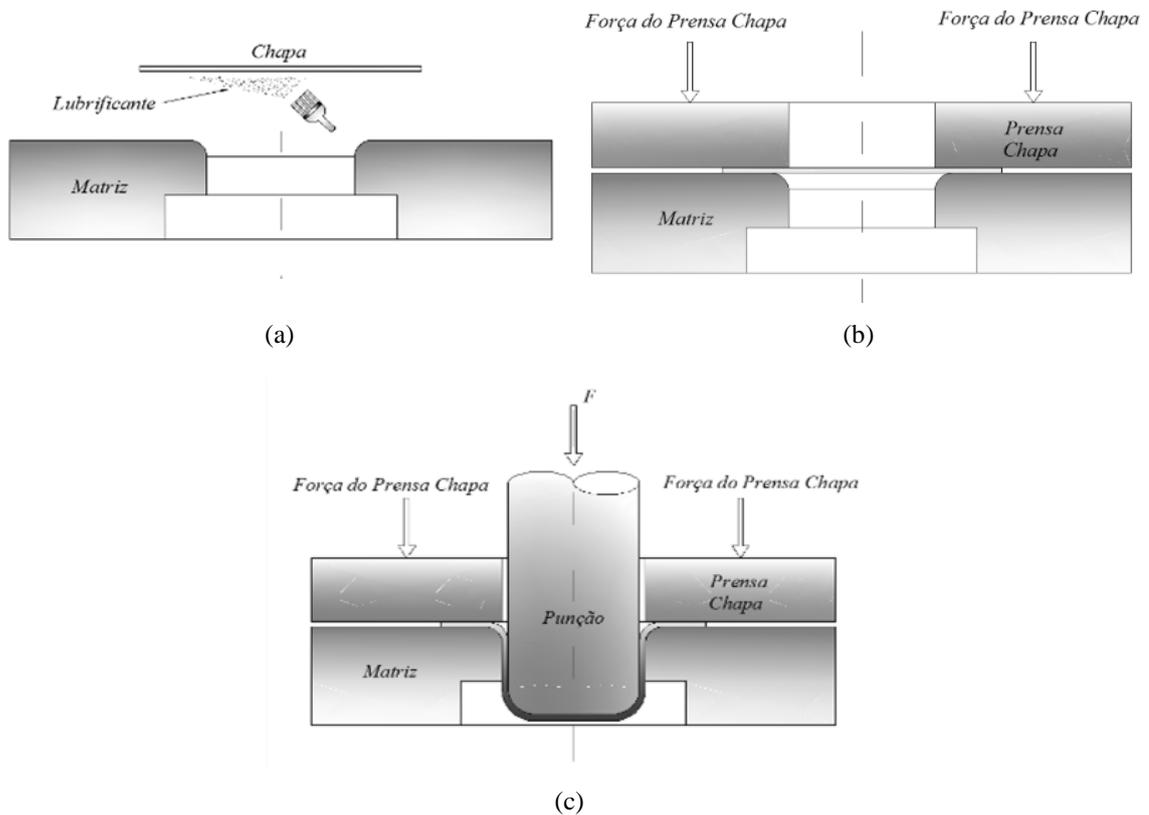
(a) Chapa antes da estampagem; e (b) Chapa após a estampagem.

Fonte: DIETER, 1981.

Segundo Magalhães (2005), o primeiro passo que deve ser feito em uma operação de estampagem profunda é a aplicação de um determinado lubrificante sob a chapa, o segundo

passo é o fechamento da prensa com o prensa-chapas e o terceiro passo consiste no processo de embutimento até o punção alcançar a posição inferior na matriz, o retorno desse punção a posição inicial e a retirada do prensa-chapa. Todas estas etapas são mostradas na figura 6.

Figura 6 – Etapas do processo de embutimento ou estampagem profunda.



(a) Posicionamento e lubrificação da chapa; (b) Fechamento do prensa-chapa; e (c) Embutimento

Fonte: MAGALHÃES, 2005.

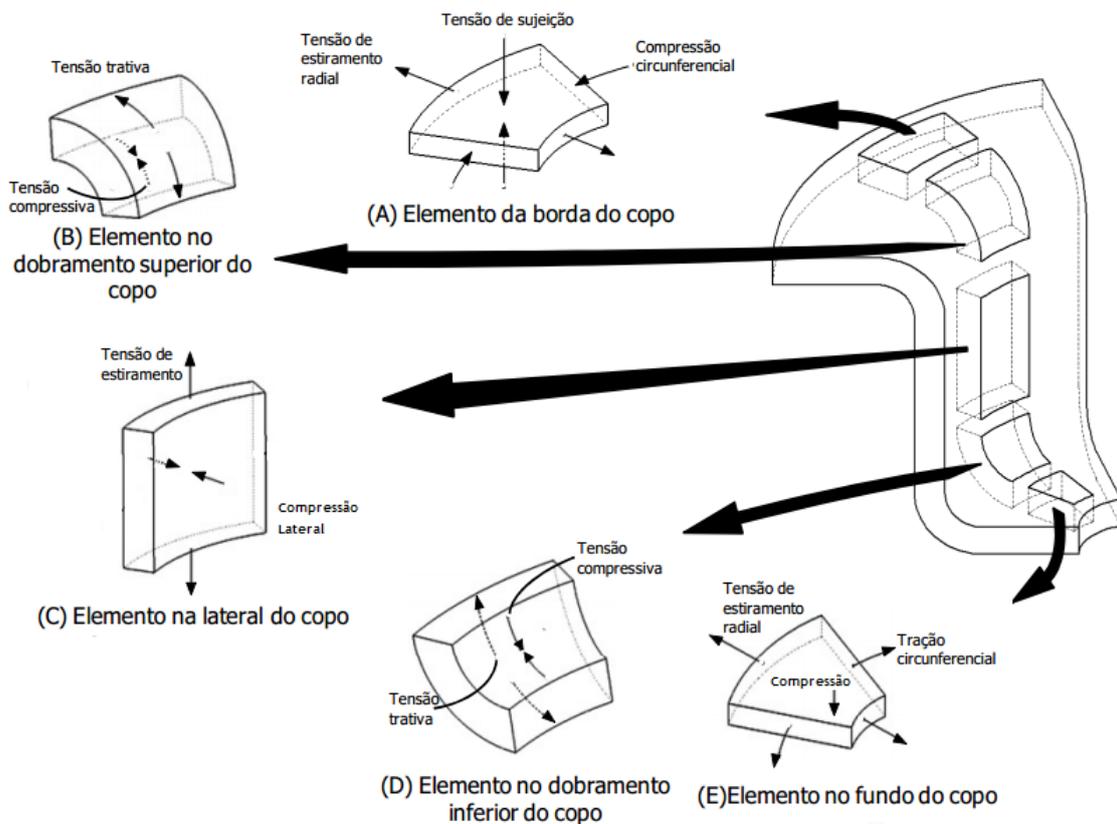
3.4.1 Análise das tensões durante a estampagem profunda

Segundo Bresciani (2011), na estampagem profunda, o *blank* é submetido a diferentes tipos de deformação e, graças a isso, o produto obtido por estampagem profunda apresenta diferentes regiões com deformações e tensões distintas:

- Região da aba ou borda do copo;
- Região do dobramento superior ou dobramento da matriz;
- Região lateral do copo;
- Região do dobramento inferior ou dobramento do punção; e
- Região no fundo do copo.

As regiões citadas acima, podem ser visualizadas na figura 7, em que para cada uma das regiões observadas têm-se três tensões principais atuando: tensão na direção longitudinal da peça (σ_1) ou, neste caso, tensão radial (σ_r); tensão na direção normal ao plano da chapa ($\sigma_2 = \sigma_n$); e tensão na direção transversal da peça (σ_3) ou, neste caso, tensão circunferencial (σ_c). O comportamento dessas tensões é variável e depende da chapa, da geometria do ferramental e de outras variáveis de processo (COSTA, 2012).

Figura 7 – Tipos de deformações que ocorrem na estampagem profunda.



Fonte: FOLLE, 2008.

O metal situado ao redor da base do punção, ou seja, situado na aba do copo, é deformado radialmente para o interior da matriz, e, à medida que isso ocorre, o diâmetro original é reduzido até o diâmetro de conformação, relativo ao diâmetro do punção. Assim, o metal está submetido a uma deformação compressiva na direção circunferencial e a uma deformação trativa na direção radial (figura 7a). Graças à ação dessas duas deformações, há um aumento na espessura da peça nessa região à medida que o metal penetra na matriz. É necessário cuidado nessa região para que não haja enrugamento na borda da peça pois, caso ocorra, as rugas serão transmitidas da borda para o interior da matriz, o que pode levar a propagação de trincas (FOLLE, 2008).

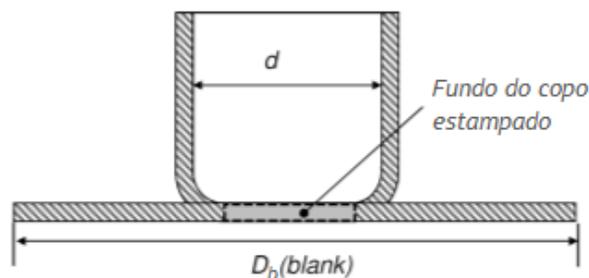
Nas regiões de dobramento superior ou dobramento da matriz (figura 7b) e dobramento inferior ou dobramento do punção (figura 7d), agem tensões trativas na superfície externa das regiões dobradas e compressivas na superfície interna (BRESCIANI, 2011). Na região de dobramento superior há risco de ruptura na superfície externa do *blank* se a força do prensa-chapa é elevada. Já no dobramento inferior há risco de ruptura na superfície externa do *blank*, devido à redução de espessura detectada comumente nesta região.

Nas laterais ou paredes do copo (figura 7c) atuam tensões trativas ao longo da parede, que provocam o estiramento desta, e também tensões de compressão, perpendiculares a superfície da parede, que provocam o afinamento da lateral. Esse estado é conhecido como “estado plano de deformação”, pois nesta região o material se deforma apenas nas direções radial e normal (deformação na direção longitudinal ($\varepsilon_r \neq 0$); deformação na direção normal ($\varepsilon_n \neq 0$); e deformação na direção transversal ($\varepsilon_c = 0$)) (COSTA, 2012). Agem ainda esforços de atrito entre a superfície externa lateral do copo e a cavidade da matriz e entre a superfície lateral interna do copo e a lateral do punção. A existência de esforços de compressão e conseqüentemente de atrito, dependem da folga existente entre as dimensões da cavidade da matriz e do punção. Se a folga for maior do que a espessura do *blank*, então não ocorrerá o efeito de afinamento e de atrito (BRESCIANI, 2011).

No fundo do copo (figura 7e), o esforço é predominantemente compressivo sendo exercido pela extremidade do punção. Este esforço é transmitido as demais partes do copo através de tensões de tração radiais (BRESCIANI, 2011).

Conforme observado na figura 8, somente o trecho da chapa plana que ocupa a área compreendida entre o diâmetro final do copo “*d*”, e o diâmetro inicial do *blank* “*D_b*” sofre grande quantidade de deformação plástica, (PONOMAREV, 2009), por isso, geralmente o fundo mantém a mesma espessura do disco inicial.

Figura 8 – Representação esquemática da deformação devida a estampagem profunda.



Fonte: PONOMAREV, 2009 (adaptado).

Na região do fundo do copo, pode-se ter problemas relativos ao aprisionamento do copo estampado, devido à pressão excessiva do punção, erro de lubrificação e falta de entrada de ar que facilite a liberação da peça da matriz (PONOMAREV, 2009).

Segundo Bresciani (2011), “o esforço de estampagem é igual à soma dos esforços atuantes em todas as partes do copo” e pode ocorrer fissura no copo embutido se, em qualquer uma das partes deste, o esforço de estampagem acarretar em uma tensão que seja superior ao limite de resistência do material do *blank*.

Ainda de acordo com Bresciani (2011, p. 67), devido à presença de diferentes estados de tensões nas diversas partes do copo, cada região da peça apresenta variação de espessura. E nota-se que a região lateral é a que apresenta maior variação de espessura, sendo que a região lateral superior da parede possui uma espessura maior que a lateral inferior. Isso se deve ao fato de que na lateral superior age a maior tensão de compressão enquanto que na lateral inferior age a maior tensão de tração. Por isso, é necessário analisar as variáveis metalúrgicas e de processo da operação de estampagem profunda.

3.4.2 Variáveis da operação de estampagem profunda

3.4.2.1 Variáveis de processo

O processo de estampagem profunda é controlado por diversos fatores. Os parâmetros de processo que influenciam na operação de estampagem profunda incluem: forma e dimensões da peça, forma e dimensão das ferramentas (punção e matriz), tipo de prensa empregado e a velocidade de prensagem, força do prensa-chapas e condições de lubrificação (BRESCIANI, 2011). Esses fatores têm influência direta nos estados de tensão e deformação existentes em cada instante do processo nas diversas regiões da peça em formação, por isso é fundamental compreendê-los.

3.4.2.1.1 Forma e dimensão da peça

Em relação a forma da peça, quanto mais complexa esta for, mais difícil é a determinação dos esforços necessários para conformação e limites admissíveis de deformação plástica do *blank*. Por isso, segundo Bresciani (2011), realiza-se o estudo da estampagem de um copo a partir de um esboço na forma de *blank*, numa condição simplificada, porém típica do processo de estampagem. Na condição simplificada, referindo-se a forma e dimensões da peça, é importante

estabelecer a relação entre diâmetro do *blank*, diâmetro do copo e altura do copo formado e estabelecer a espessura inicial do *blank*.

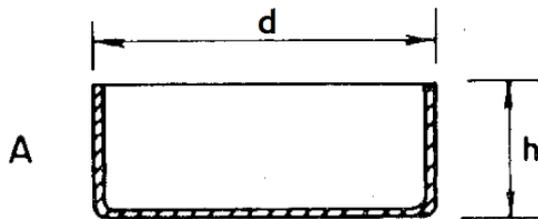
3.4.2.1.2. Determinação da dimensão inicial do blank

Segundo Chiaverini (1986a) é necessário conhecer as dimensões do *blank* que o origina a peça a ser estampada, para se utilizar a menor quantidade de material possível. O diâmetro inicial do *blank* (D_b) é determinado através da equação (3), para copos que não apresentam aba.

$$D_b = \sqrt{d^2 + 4dh} \quad (3)$$

Em que as variáveis dessa equação são vistas na figura 9 e representam: o diâmetro do copo, d , e a altura do copo, h .

Figura 9 – Copo cilíndrico estampado sem aba (flange).



Fonte: CHIAVERINI, 1986a.

3.4.2.1.3. Espessura inicial do blank

De acordo com Rossi (1979), utilizar um *blank* de maior espessura resulta em uma melhor estampagem profunda, pois quanto maior a espessura do *blank*, menos pronunciada será a tendência das bordas do copo de enrugarem. Porém, como resultado, eleva-se o esforço de conformação necessário para deformar o *blank*.

Uma maior espessura do *blank* pode levar também ao desgaste no raio da matriz, uma vez que a pressão envolvida na matriz é concentrada na sua curvatura (raio) e a pressão exercida sobre as matrizes aumenta proporcionalmente ao quadrado da espessura inicial do *blank* (ASM HANDBOOK, 1993b).

3.4.2.1.4. Forma e dimensão das ferramentas

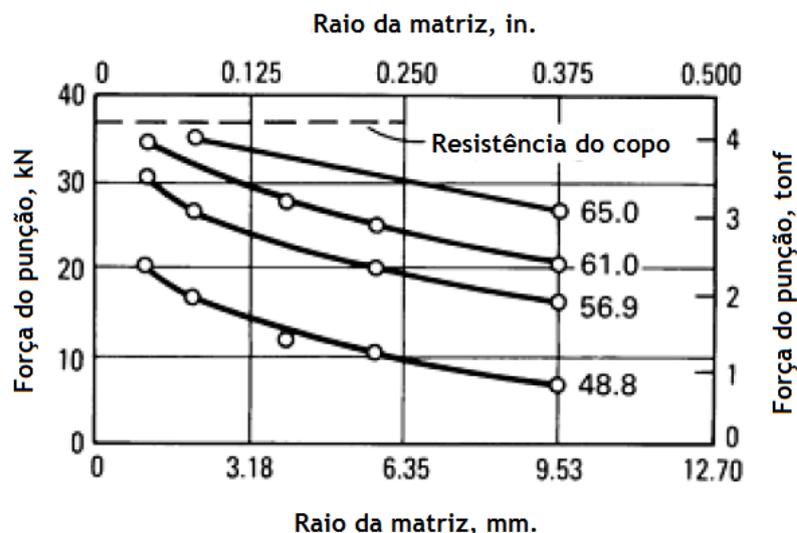
As ferramentas de conformação exercem uma grande influência na operação de estampagem profunda através de três principais variáveis: através dos raios do punção e da matriz, através da folga entre o punção e a matriz e devido a força do prensa-chapa.

3.4.2.1.5. Efeito dos raios do punção e da matriz

Segundo Bresciani (2011), o dobramento do *blank* sobre o raio de concordância do punção é praticamente estacionário e o dobramento do *blank* sobre o raio da matriz de estampagem implica na ocorrência de deslizamento da chapa. Isso demonstra que deve-se considerar o raio da matriz como um fator de influência no processo de estampagem.

É possível observar na figura 10 que a estampagem é promovida pelo aumento do raio da matriz e do punção, pois para uma dada condição de estampagem, a força do punção necessária para empurrar o metal para dentro da matriz diminui à medida que o raio da matriz aumenta. Por isso, o raio da matriz deve ser suficientemente grande para não elevar exageradamente o esforço de conformação e, conseqüentemente, não reduzir a capacidade de estampagem de uma determinada peça (ASM HANDBOOK, 1993b).

Figura 10 – Efeito do raio da matriz na força do punção necessária para promover a estampagem de vários diâmetros de um blank de 1mm de espessura da liga C27400.



Fonte: ASM HANDBOOK, 1993b (adaptado).

O punção e a matriz são ferramentas fundamentais em uma operação de estampagem profunda, pois são responsáveis por dar a forma desejada a peça final e, para um bom desempenho destas ferramentas, deve existir folga entre as duas, folga esta que depende da espessura do *blank* e do tipo de material a ser usado (BRITO *apud* AMORIM, 2012).

A construção do punção e da matriz com uma determinada folga, é imposta devido à necessidade de (POLACK, 1974):

- Reduzir as forças necessárias para estampagem;

- Evitar atritos desnecessários e estrangulamentos;
- Aumentar a durabilidade do estampo; e
- Produzir peças com relativas tolerâncias.

Ainda segundo Polack (1974), a folga entre o punção e a matriz deve ser de 10% a 20% da espessura do *blank* a ser embutido. Quando a folga for bem determinada, o desgaste da matriz e do punção será menor. Se a folga for excessiva pode ocasionar deformação no produto e quando a folga é insuficiente pode ocasionar maior esforço sobre a matriz, chegando ao ponto de trincar a matriz e quebrar o punção (BRITO *apud* AMORIM, 2012).

3.4.2.1.6. Força do prensa-chapa e relação de embutimento

Como mencionado anteriormente, as tensões compressivas que atuam na borda do copo são responsáveis pelo enrugamento do *blank*. Um procedimento utilizado na estampagem profunda para evitar este problema superficial na peça é o uso do prensa-chapa, que exerce uma pressão extra sobre a chapa para evitar o enrugamento da mesma (LANGE *apud* MAGALHÃES, 2005).

A pressão necessária para impedir a formação de rugas na chapa a ser embutida pode ser estimada através da relação de embutimento, espessura da chapa (*blank*) e do tipo de material, e é calculada através da equação (4) (LANGE *apud* MAGALHÃES, 2005).

$$P_{\text{prensa-chapas}} = 1000 \times C \times \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0,005 \times D_b}{t_0} \right] \times \sigma_u \quad (4)$$

Em que: C = constante - varia entre 2 e 3 (associada ao atrito);
 t_0 = espessura inicial do *blank* [mm];
 D_b = diâmetro do *blank* [mm];
 β = relação de embutimento; e
 σ_u = tensão limite de resistência a tração do material [MPa].

A relação de embutimento é dada pela equação (5).

$$\beta = \frac{D_b}{D_p} \quad (5)$$

Em que D_b é o diâmetro do *blank* e D_p o diâmetro do punção.

Caso o limite de estampabilidade, expresso pela relação de embutimento, seja excedido, ocorrerá a ruptura nas paredes ou no raio do fundo da peça embutida. Do ponto de vista teórico,

o valor máximo da relação de embutimento não pode exceder a 2,1 (LANGE *apud* MAGALHÃES, 2005).

3.4.2.1.7. Tipo de prensa e velocidade de prensagem

A estampagem profunda pode ser realizada utilizando-se prensas mecânicas ou hidráulicas. Segundo Bresciani (2011), para a operação de estampagem profunda “são preferidas as prensas hidráulicas, pois estas conferem ao processo condições de velocidade de deformação controlada e constante e uma maior uniformidade na aplicação de pressão pelo prensa-chapas”.

A velocidade de prensagem depende de algumas condições de operação, sendo as condições ideais as seguintes: uso de metal adequado, produção de peças simétricas, lubrificação adequada ferramentas de precisão, pressão do prensa-chapas controlada e prensas que mantem um alto nível de precisão. Quando uma ou mais das condições mencionadas não for ideal, a redução na velocidade de prensagem é requerida (ASM HANDBOOK, 1993b).

Magalhães (2005) cita que a velocidade de prensagem deve ser ajustada, sempre que possível, de tal forma a ser mínima quando o punção incide sobre o material e ir aumentando gradativamente durante a conformação da peça. Ainda segundo Magalhães (2005), quanto menor for a velocidade da prensa, maior será a relação de embutimento (β) obtida e, portanto, maior a estampabilidade do material até um certo valor limite antes de ocorrer sua ruptura.

3.4.2.1.8. Lubrificação e atrito

A lubrificação é feita para reduzir os esforços de atrito entre a chapa e a matriz, entre a chapa e o punção e entre a chapa e o prensa-chapas. Para uma lubrificação conveniente, deve-se levar em conta que lubrificante será empregado e como este deve ser empregado (POLACK, 1974).

O lubrificante que será empregado varia de acordo com o metal da chapa e com o tipo de embutimento, sendo constituídos normalmente por óleos ou graxas, que podem ou não serem diluídos em água. É importante conseguir que o lubrificante atinja todos os pontos em que a chapa faz contato com a matriz, o punção e o prensa-chapas (POLACK, 1974). Também é necessário considerar dificuldade de remoção do lubrificante.

3.4.2.2. Variáveis metalúrgicas ou do material

Os fatores de natureza metalúrgica são aqueles relacionados ao material da peça que será produzida. Logo, as variáveis metalúrgicas que influenciam na operação de estampagem profunda são: composição química, estrutura do material, já citados no item 3.1.2.4, e anisotropia. Estes fatores dependem do processo de fabricação por laminação e do tratamento térmico de recozimento, pois estes afetam as propriedades mecânicas do material da chapa e são de importância fundamental em seu comportamento na estampagem (BRESCIANI, 2011).

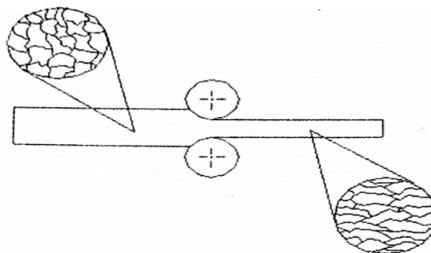
Segundo Dieter (1981), os cristais constituintes do material metálico podem se orientar de maneira preferencial, dependendo da quantidade de deformação aplicada sobre este. Essa orientação é denominada textura cristalográfica.

Um metal não apresenta textura quando a distribuição das orientações cristalinas é aleatória. Porém, a maioria dos materiais metálicos apresenta textura devido ao fato de que as diferentes etapas de processamento dos metais, tais como solidificação, deformação plástica e recristalização, conduzem a uma distribuição de orientação preferencial segundo as principais direções de escoamento do metal durante a deformação (BRESCIANI, 2011).

Em um material policristalino, a textura cristalográfica confere propriedades físicas e mecânicas diferentes para as diferentes direções macroscópicas do corpo metálico, conduzindo o material metálico a um comportamento anisotrópico, que influencia em uma operação de estampagem de sucesso (DEARDO, 1998).

O fenômeno da anisotropia é causado pelo alongamento dos grãos na direção de maior deformação de tração. Como as chapas utilizadas nos processos de estampagem são provenientes do processo de laminação, é sabido que há anisotropia nas chapas na direção do sentido de laminação (SCHAEFFER, 2009). A figura 11 ilustra a anisotropia dos grãos no sentido de laminação.

Figura 11 – O processo de laminação como origem da anisotropia.



Fonte: SCHAEFFER, 2009

Um método de avaliar o grau de anisotropia de chapas deformadas plasticamente é através do cálculo do coeficiente de anisotropia médio ou coeficiente Lankford (\bar{R}), definido na equação (6), que também avalia a resistência ao afinamento da chapa durante o processo de estampagem (BRESCIANI, 2011).

$$\bar{R} = \frac{R_{0^\circ} + R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4} \quad (6)$$

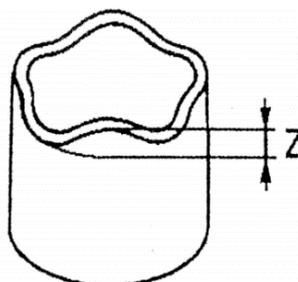
Em que: R_{0° = valor medido para corpos de prova retirados segundo a direção de laminação longitudinal
 R_{45° = valor medido para corpos de prova retirados segundo 45° a direção de laminação
 R_{90° = valor medido para corpos de prova retirados segundo a direção de laminação transversal

Já o fenômeno de orelhamento, que pode ser visualizado na figura 12, é associado ao coeficiente de anisotropia planar (ΔR), em que a altura das orelhas formadas (Z) é maior se for utilizado um material com coeficiente alto. O coeficiente de anisotropia planar indica a diferença de comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa (SCHAEFFER, 2009). Este coeficiente é definido na equação (7).

$$\Delta R = \frac{R_{0^\circ} + R_{90^\circ} - 2 \cdot R_{45^\circ}}{2} \quad (7)$$

Ambos, coeficiente de anisotropia médio e coeficiente de anisotropia planar, dependem da textura da chapa laminada, podendo haver duas condições distintas caso a chapa seja anisotrópica: (a) $\bar{R} > 1$, na qual a direção de maior resistência é perpendicular ao plano da chapa; e (b) $\bar{R} < 1$. Dessa forma, uma melhor condição de estampabilidade é adquirida quando se obtém na fabricação de chapas por laminação valores elevados para o coeficiente de anisotropia médio e baixos valores para o coeficiente de anisotropia planar (BRESCIANI, 2011).

Figura 12 – Copo cilíndrico estampado com orelhamento.



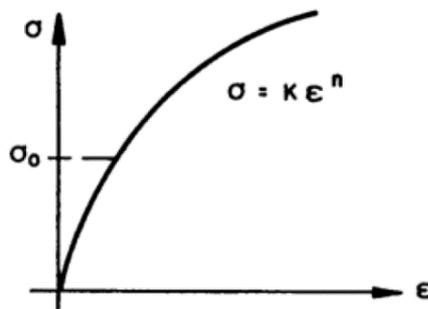
Fonte: SCHAEFFER, 2009

O recozimento influencia na textura do material pois, quando o metal é recristalizado, novos grãos de certas orientações preferenciais irão ser formados e isso substitui a textura prévia de deformação por outra: a textura de recristalização. Esse aspecto deve ser levado em consideração, uma vez que a conformabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos pode ser melhorada se for aumentado o componente de textura {111} destes aços (DEARDO, 1998).

3.5 ENCRUAMENTO

Segundo Ashby (2007), o encruamento de um metal é definido como seu endurecimento por deformação plástica a frio. Este fenômeno metalúrgico pode ser observado em uma curva de tensão-deformação obtida por um ensaio de tração uniaxial, como mostrado na figura 13, em que há um aumento da tensão (σ) em função do aumento da quantidade de deformação plástica (ϵ), a partir do limite de elasticidade (σ_0).

Figura 13 – Encruamento representado em uma curva típica tensão-deformação.



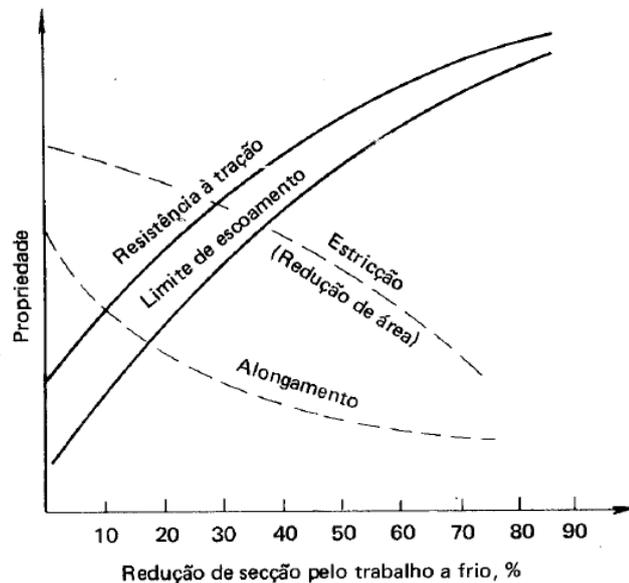
Fonte: BRESCIANI, 2011.

Em deformação plástica o metal apresenta um aumento do número de discordâncias e de interações entre estas, o que impede seu movimento através da rede cristalina, pode-se dizer que o encruamento se dá basicamente devido a esse fator e, portanto, há necessidade de uma tensão maior para provocar maior deformação plástica no metal (DIETER, 1981).

De acordo com Chiaverini (1986b), o aumento da quantidade de trabalho a frio tem influência sobre diversas características do metal, porém as alterações mais significativas estão relacionadas as propriedades mecânicas dos metais, como pode ser observado na figura 14.

Vários fatores influenciam o encruamento do metal, tais como: estrutura cristalina do metal, pureza do metal, orientação do cristal metálico, temperatura no processo de deformação, taxa de deformação, forma e dimensão do cristal metálico, condições superficiais do cristal metálico e a trajetória de deformação (BRESCIANI, 2011).

Figura 14 – Representação esquemática do efeito do encruamento em algumas propriedades mecânicas dos metais.



Fonte: CHIAVERINI, 1986b.

3.6 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos são de extrema importância para indicar características e propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando este está sob a ação de esforços (GARCIA et al, 2000). Dessa maneira, serão apresentados os dois ensaios mecânicos utilizados para caracterizar o comportamento mecânico do material estudado: o ensaio de cisalhamento planar simples e o ensaio de microdureza Vickers.

3.6.1 Ensaio de Cisalhamento Planar Simples

O ensaio de cisalhamento planar simples tem demonstrado ser uma técnica muito eficiente para avaliação de propriedades mecânicas de amostras planas, tais como chapas ou produtos obtidos nas operações de estampagem (RAUCH, 1998).

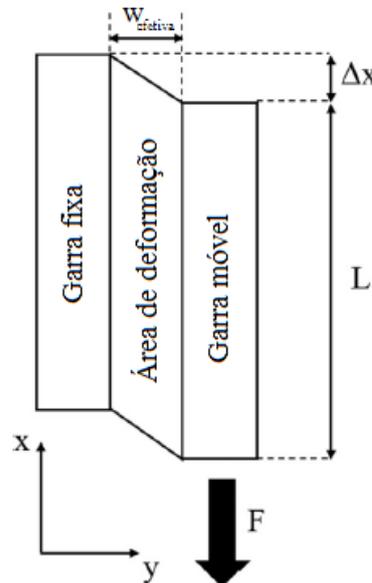
O primeiro equipamento utilizado para realização deste teste, referido na literatura, foi o desenvolvido por Miyauchi (1984). Uma segunda versão do dispositivo de cisalhamento simples foi proposta por G'Sell *et al.* (1983) para polímeros e posteriormente adaptado para materiais metálicos por Rauch e G'Sell (1989).

Este ensaio foi desenvolvido com o objetivo de se contornar as desvantagens dos métodos já existentes, como por exemplo, o ensaio de tração em termos de preparação mais simples do

corpo de prova, em que apenas deve ser feito um corpo de prova retangular, e o fato de que grandes deformações podem ser alcançadas sem gerar instabilidade plástica (estricção), fraturas ou outros fenômenos que envolvem a deformação plástica (CHOI *et al.*, 2015). Além disso, apresenta diversas vantagens sobre os testes uniaxiais: a distribuição de tensão é homogênea ao longo do comprimento; no plano avaliado o cisalhamento é simétrico em ambas as direções; efeitos de anisotropia são bem nítidos; e a taxa de deformação da seção cisalhada permanece constante ao longo de todo o ensaio (RICKHEY *et al.*, 2015).

O dispositivo do ensaio de cisalhamento planar simples para chapas é constituído por duas garras rígidas, submetidas a um movimento paralelo (BOUVIER *et al.*, 2006). O corpo de prova é preso pelas duas garras, e uma permanece imóvel, enquanto a outra se movimenta ao longo do eixo x, como mostrado na figura 15. A constante de largura, ou largura efetiva ($w_{efetiva}$) da área de deformação, é mantida durante todo teste. O comprimento do corpo de prova é dado por L e o deslocamento relativo das duas garras durante a deformação por cisalhamento é dada por Δx (CHOI *et al.*, 2015).

Figura 15 – Esquema descritivo do ensaio de cisalhamento planar simples.



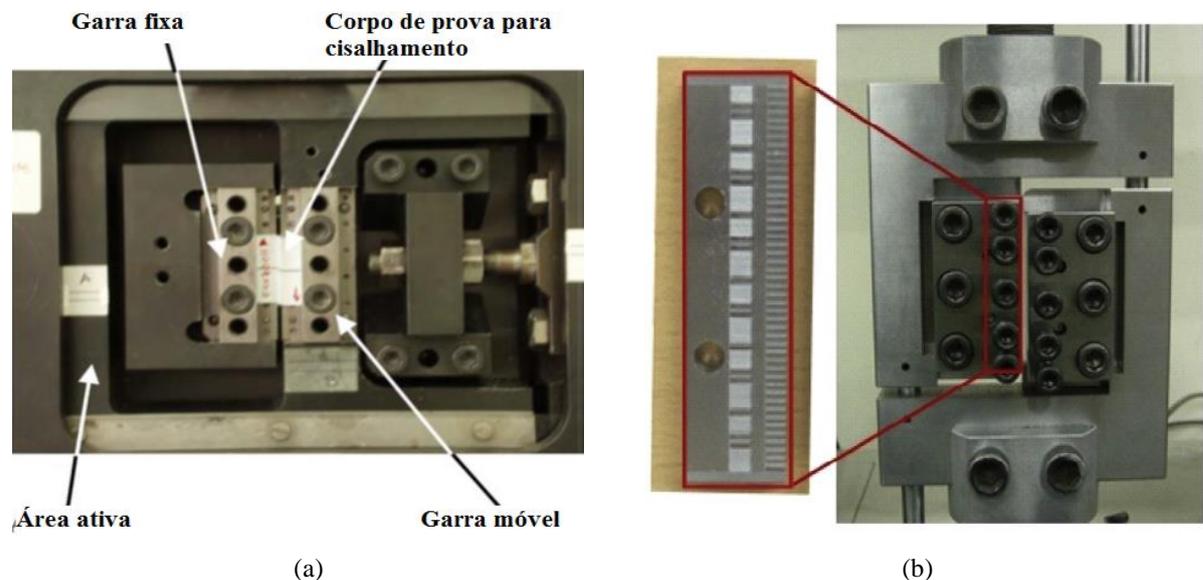
Fonte: CHOI *et al.*, 2015 (adaptado).

Rauch (1992) salienta que a homogeneidade da distribuição de tensão e deformação ao longo do corpo de prova afetam a qualidade do ensaio realizado. Lopes (2009) utilizou simulações por elementos finitos para demonstrar que a maneira mais simples de garantir a qualidade do ensaio e reduzir heterogeneidades é através do controle das dimensões do corpo de prova. Lopes (2009) ainda afirma que a razão entre o comprimento da amostra, L, e a largura efetiva

submetida ao cisalhamento, $w_{efetiva}$, deve ser maior do que 10 para minimizar a influência das extremidades livres na distribuição de tensão ao longo do corpo de prova.

A figura 16 apresenta diferentes dispositivos construídos e utilizados para o ensaio de cisalhamento planar simples. Na figura 16(a), tem-se o dispositivo construído e utilizado por Bouvier *et al* (2006) e na figura 16(b) o dispositivo construído e utilizado por Rickhey *et al* (2015) é apresentado.

Figura 16 – Equipamento projetado para o ensaio de cisalhamento planar simples.



(a) projetado por Bouvier *et al* (2006); e (b) projetado por Rickhey *et al*.(2015).

Fonte: (a) BOUVIER *et al*, 2006 (adaptado); (b) RICKHEY *et al*, 2015.

3.6.2 Ensaio de microdureza Vickers

Souza (1982) afirma que a propriedade mecânica de dureza é bastante utilizada na especificação de materiais e em pesquisas, porém não existe um consenso sobre o conceito único de dureza. No entanto, sob este ponto de vista, é possível definir o ensaio de dureza.

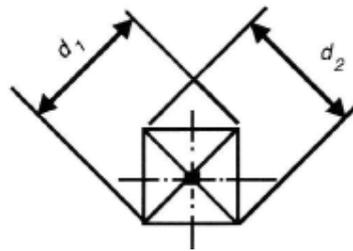
De acordo com Garcia *et al* (2000), o ensaio de dureza consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça pela aplicação de pressão com um penetrador e a medida de dureza é dada como função das características da marca de impressão e da carga aplicada.

O ensaio de microdureza difere-se do ensaio de dureza, pois resolve o problema de determinação de dureza em constituintes individuais da microestrutura, de materiais frágeis e

de peças pequenas ou extremamente finas, como no caso do produto estampado a partir de uma chapa fina (SOUZA, 1982).

O ensaio de microdureza Vickers produz uma impressão microscópica no material, empregando uma carga menor que 1kgf com uso de um penetrador de diamante com formato de pirâmide de base quadrada, com ângulo de 136° entre as faces opostas. A impressão deixada pelo penetrador utilizado no ensaio de microdureza Vickers é um losango regular, que pode ser visto na figura 17 (GARCIA *et al*, 2000).

Figura 17 – Esquema representativo da impressão deixada pelo método de dureza Vickers.



Fonte: GARCIA *et al*, 2000.

Utilizando um microscópio acoplado a máquina de teste, as diagonais devem ser medidas e a média das duas diagonais é utilizada para determinação da dureza Vickers, utilizando a equação (8) (GARCIA, 2000).

$$HV = 0,189 \times \frac{F}{d^2} \quad (8)$$

Muitos dos microdurômetros já retornam o valor de dureza automaticamente, sem a necessidade de utilização da equação (8) para avaliação da dureza.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta o aço inoxidável AISI 409 utilizado no estudo e sua caracterização estrutural (microscopia óptica e difração de raios-X) e mecânica (microdureza Vickers), tanto no estado como recebido, quanto após o tratamento térmico de recozimento. Em seguida são apresentadas as três etapas de desenvolvimento do trabalho: a) obtenção dos corpos de prova; b) a estampagem profunda, que será chamada simplesmente de estampagem neste trabalho para simplificação; e c) os ensaios mecânicos realizados.

4.1 Material

Neste trabalho foram utilizadas chapas do aço inoxidável ferrítico AISI 409 cedidas pela empresa Aperam South America, com espessura inicial de 1,0 mm e acabamento tipo 2D, com aparência superficial cinza fosca, segundo a especificação da norma ASTM A 480, apontando que o material foi laminado a frio, recozido e decapado.

A composição química do aço AISI 409 foi obtida por meio da análise de uma amostra pela técnica de emissão óptica, utilizando o equipamento *Foundry Master Xpert* da *Oxford Instruments*, que pode ser visualizado na figura 18. A tabela 1 mostra os resultados obtidos para a amostra.

Figura 18 – Equipamento utilizado para análise química do aço inoxidável ferrítico AISI 409.



Fonte: Autor.

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável ferrítico AISI 409 (% em peso).

Tipo	C	Mn	Si	Cr	Ti
AISI 409	0,055	0,154	0,655	10,5	0,148

Fonte: Autor.

A composição química especificada pela empresa Aperam está disposta na tabela 2.

Tabela 2 – Composição química do aço inoxidável ferrítico AISI 409 (% em peso) disponibilizada no catálogo da Aperam.

Tipo	C	Mn	Si	Cr	Ti
AISI 409	0,01	0,30	0,45	11,30	0,19

Fonte: APERAM, 2012.

E a especificação técnica deste material, de acordo com o ASM Handbook (1993a), está disposta na tabela 3, sendo possível observar que os teores dos elementos químicos, apresentados pela Aperam e obtidos pela técnica de emissão óptica, condizem com a especificação técnica da literatura.

Tabela 3 – Especificação técnica do aço inoxidável ferrítico AISI 409 (% em peso).

Tipo	C	Mn	Si	Cr	Ti
AISI 409	máximo 0,08	máximo 1,00	máximo 1,00	10,5 - 11,75	máximo 0,75

Fonte: ASM HANDBOOK, 1993a (adaptado).

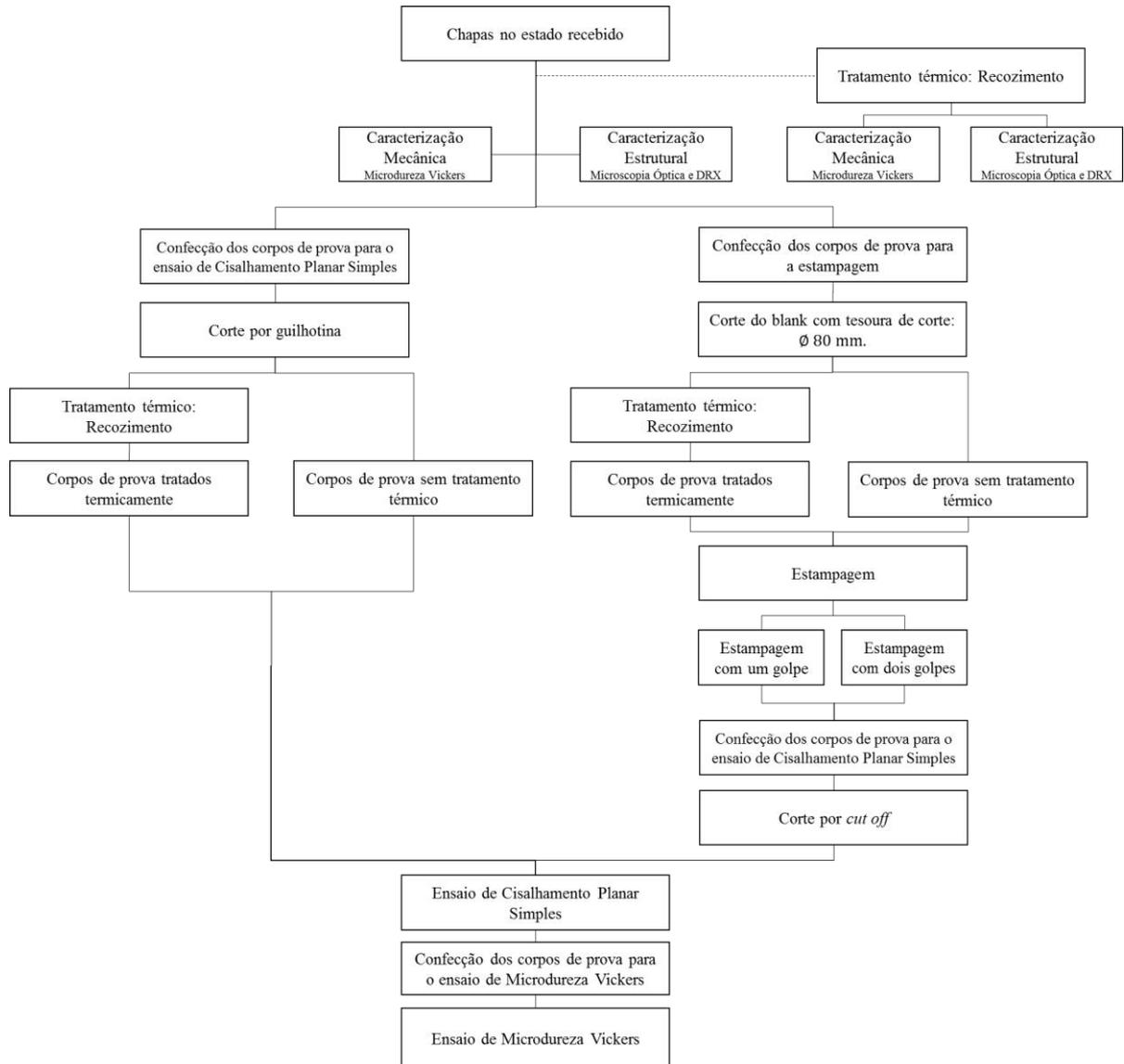
O aço inoxidável ferrítico AISI 409, como mostrado nas tabelas 1, 2 e 3 de composição química, apresenta aproximadamente 11% de cromo. Portanto, a presença de um elemento estabilizante, no caso o titânio, é requerida para ser possível manter todo cromo em solução e evitar a sensitização (NOONING, 2002).

Este aço foi escolhido para a realização deste trabalho por ser utilizado em diversas operações de estampagem de chapas, principalmente na indústria automobilística, em que uma de suas aplicações mais importantes é na fabricação de sistemas de exaustão de gases em motores de explosão (FARIA, 2006).

4.2 Procedimento Experimental

A sequência de procedimentos adotados para o estudo do comportamento mecânico do aço inoxidável ferrítico AISI 409 é apresentada no fluxograma da Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma do procedimento experimental realizado.



Fonte: Autor.

4.3 Caracterização do material

4.3.1 Caracterização estrutural

A caracterização estrutural do aço AISI 409 foi realizada com o material em duas condições: no estado como recebido e após o tratamento térmico de recozimento em laboratório, que será detalhado no item 4.4. Para cada uma das condições, a caracterização foi em duas etapas: a primeira etapa consistiu na análise de uma amostra por meio de observações por microscopia óptica e a segunda etapa consistiu na análise de uma amostra por meio da técnica de difração de raios-X (DRX). Portanto, foram feitas análises em duas amostras por meio de microscopia óptica: uma tratada termicamente e outra no estado como recebido; e análises em duas amostras

por meio da técnica de difração de raios-X: uma tratada termicamente e outra no estado como recebido. Para simplificação, será descrita a metodologia referente apenas uma amostra para cada etapa de caracterização estrutural, pois as condições de preparação e caracterização foram idênticas.

Para observação por microscopia óptica, realizou-se, a princípio, a preparação metalográfica do material, que foi conduzida de forma usual. Primeiramente foi feito o corte da chapa do aço AISI 409 na guilhotina U-136-D da Peck, Stow & Wilcox Co., do departamento de Engenharia de Materiais, que pode ser visualizada na figura 20, obtendo-se amostra com dimensões de 15,0 mm (comprimento) x 15,0 mm (largura). Em seguida a amostra foi embutida a frio em um molde de silicone, utilizando o acrílico auto-polimerizante JET da Clássico.

Figura 20 – Guilhotina U-136-D utilizada para corte das amostras.



Fonte: Autor.

Logo após, a amostra foi lixada em lixadeiras *Struers* utilizando lixas d'água na sequência de mesh: # 240, # 320, # 400 e # 600, sendo executadas girando-se a amostra em 90° após utilização de cada lixa. O polimento foi feito nas politrizes Arotec Aropol 2V, utilizando os panos de 9 µm e 3 µm com pasta de diamante. O ataque do aço inoxidável AISI 409 foi feito com o uso do reagente químico Vilella (1 g de ácido pícrico, 5 ml de ácido clorídrico concentrado e 100 ml de etanol) (ASM HANDBOOK, 1992), durante 53 segundos. Por fim, foram obtidas as imagens com o auxílio do microscópio metalográfico de platina invertida da marca Kontrol, representada pela Fortel, mostrado na figura 21.

Figura 21 – Microscópio óptico utilizado para análise microestrutural.



Fonte: Autor.

Já para análise por difração de Raio-X o equipamento utilizado foi o Difratorômetro de Raios-X XRD-7000 da SHIMADZU, com alvo metálico de cobre, apresentado na figura 22. Inicialmente amostra de 50 mm (comprimento) x 15 mm (largura) foi obtida a partir do corte da chapa do aço AISI 409 utilizando a guilhotina U-136-D da Peck, Stow & Wilcox Co. Em seguida, posicionou-se a amostra adequadamente no equipamento e iniciou-se a análise. Para a amostra foram utilizados ângulos de varredura entre 20° e 100° (vinte e cem graus), uma taxa de 0,02°/min (dois centésimos de grau por minuto).

A identificação das fases foi feita por meio da comparação do difratograma obtido com o padrão de difração da fase ferrita (α), principal constituinte do aço inoxidável ferrítico.

Figura 22 – Difratorômetro utilizado para análise de Difração de Raios-X.



Fonte: Autor.

4.3.2 Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica do aço AISI 409 foi realizada com o material em duas condições: no estado como recebido e após o tratamento térmico de recozimento em laboratório, que será detalhado no item 4.4. Para cada uma das condições, a caracterização de uma amostra foi feita com base no ensaio de microdureza Vickers. Para simplificação, será descrita a metodologia referente apenas uma amostra, pois as condições de preparação e caracterização foram idênticas.

Inicialmente obteve-se a amostra de dimensões: 15,0 mm (comprimento) x 15,0 mm (largura), com o auxílio da guilhotina U-136-D da Peck, Stow & Wilcox Co e, em seguida, esta foi embutida a frio em um molde de silicone, utilizando o acrílico auto-polimerizante JET da Clássico. Logo após, a amostra foi lixada em lixadeiras *Struers* utilizando lixas d'água na sequência de mesh: # 240, # 320, # 400 e # 600, sendo executadas girando-se a amostra em 90° após utilização de cada lixa.

Ao final do lixamento, a amostra foi submetida ao ensaio de microdureza Vickers, utilizando o microdurômetro digital HMV-2 da marca SHIMADZU, mostrado na figura 23, a uma ampliação de 400x. Foram realizadas dez medições na amostra, sendo aplicada uma carga de 0,3 kgf (2,942 N) e tempo de indentação de 15 segundos.

Figura 23 – Microdurômetro digital utilizado para realização dos testes.



Fonte: Autor.

4.4 Tratamento Térmico

O recozimento foi o tratamento térmico realizado neste trabalho com o objetivo de mudar a condição inicial do material que, inicialmente, acreditava-se estar em um estado pré-deformado em laminação, para outro recozido em termos de estrutura cristalina. Consequentemente, outro

objetivo foi investigar a influência dessa variável na resposta do material estudado. Para tal foi utilizado o forno elétrico da marca *Magnus*, com sistema de controle digital de temperatura, mostrado na figura 24.

Este tratamento térmico foi realizado a temperatura de 850°C, com tempo de encharque de uma hora e resfriamento lento, dentro do forno.

Figura 24 – Forno elétrico da marca Magnus utilizado na realização do tratamento térmico.



Fonte: Autor.

4.5 Corpos de prova

4.5.1 Corpos de prova para estampagem

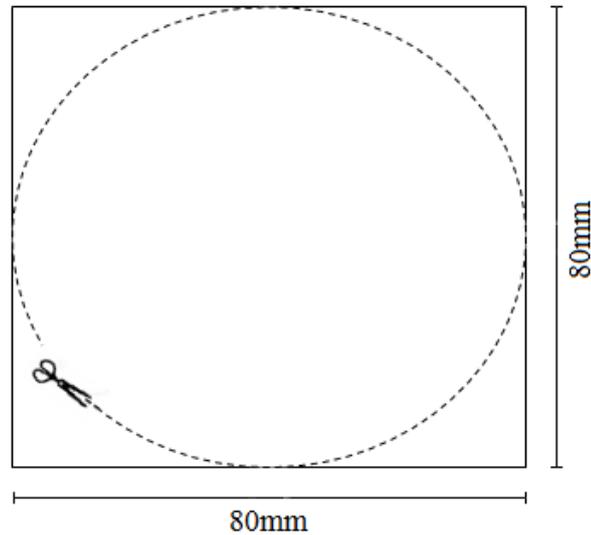
Para realização da estampagem, que será detalhada no item 4.6, foram cortadas, a partir das chapas do aço AISI 409 recebidas, doze chapas em formatos de quadrados de 80,0 mm (comprimento) x 80,0 mm (largura), com auxílio da guilhotina Newton TM 10, que pode ser visualizada na figura 25. Posteriormente, com o auxílio um compasso e de uma tesoura de corte de chapas, estas chapas foram cortadas em formatos circulares de diâmetro 80,0 mm, chamados de *blanks*, conforme tamanho da matriz a ser utilizada na estampagem. O modelo de corpo de prova utilizado na estampagem de chapas é mostrado na figura 26.

Figura 25 – Guilhotina Newton utilizada para corte das chapas.



Fonte: Autor.

Figura 26 – Modelo utilizado para confecção dos corpos de prova utilizados para estampagem.



Fonte: Autor.

Após o corte, os *blanks* obtidos foram sequencialmente numerados, sendo que destes, seis foram tratadas termicamente, conforme descrito no item 4.4 e seis não foram tratados termicamente.

4.5.2 Corpos de prova para o ensaio de Cisalhamento Planar Simples

Os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento planar simples foram obtidos a partir de duas situações: do material como recebido – quatro corpos de prova; e a partir do material estampado com um ou dois golpes – doze corpos de prova. A estampagem será detalhada no item 4.6.

Não existem normas específicas relacionadas as dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento. Porém, segundo Rauch (1992), o corpo de prova deve apresentar dimensões mínimas que assegurem a homogeneidade na distribuição da tensão e da deformação durante a execução do ensaio de cisalhamento, visando a qualidade do ensaio e a correta fixação do corpo de prova na garra de cisalhamento. Desta maneira, é recomendado que a razão entre o comprimento e a largura efetiva da amostra seja maior do que 10. Como a largura efetiva é dada pela garra de cisalhamento e esta é determinada como sendo 3,5 mm, o comprimento das amostras sempre deve ser maior do que 35 mm.

Assim, em relação aos corpos de prova obtidos a partir do material no estado como recebido, estes foram obtidos com auxílio da guilhotina Newton TM 10, e as dimensões adotadas foram de 50,0 mm (comprimento) x 15,0 mm (largura total) x 1,0 mm (espessura). Após o corte dos corpos de prova, dois foram submetidos a etapa de tratamento térmico e dois não foram tratados termicamente.

Já em relação aos corpos de prova obtidos após a estampagem, estes foram retirados do fundo do copo estampado, que foi marcado com o tamanho necessário mínimo de comprimento para atendimento aos requisitos mínimos do ensaio. Dessa forma, com o auxílio de um *cut off*, mostrado na figura 27, utilizando o disco de corte AROTEC modelo AA 4, os corpos de prova foram obtidos. O valor da espessura das amostras dependeu do estado prévio de estampagem (um ou dois golpes).

Na figura 28 é mostrada a marcação do fundo dos copos estampados e na figura 29 é mostrado o corpo de prova já cortado para o ensaio de cisalhamento planar simples.

Figura 27 – *Cut off* utilizado para confecção dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento planar simples.



(a)



(b)

(a) *Cut off* utilizado para o corte dos corpos de prova; (b) Detalhe do copo estampado sendo cortado.

Fonte: Autor.

Figura 28 – Marcação dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento planar simples no fundo dos copos estampados.



Fonte: Autor.

Figura 29 – Corte do corpo de prova obtido para o ensaio de cisalhamento planar simples.



Fonte: Autor.

4.5.3 Corpos de prova para o ensaio de Microdureza Vickers

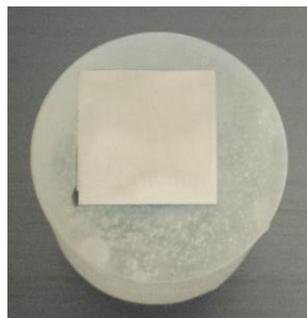
Os corpos de prova para o ensaio de Microdureza Vickers foram obtidos após o ensaio de cisalhamento planar simples.

Dessa forma, a realização do ensaio de cisalhamento planar simples, os corpos de prova foram cortados com o auxílio da guilhotina U-136-D da Peck, Stow & Wilcox Co, obtendo-se corpos de prova com dimensões de 15,0 mm (comprimento) x 15,0 mm (largura). Em seguida os corpos de prova foram embutidos a frio em um molde de silicone, utilizando o acrílico auto-polimerizante JET da Clássico.

Logo após, os corpos de prova foram lixados em lixadeiras *Struers* utilizando lixas d'água na sequência de mesh: # 180, # 240, # 320, # 400 e # 600, sendo executadas girando-se a amostra em 90° após utilização de cada lixa. A lixa de # 180 teve que ser utilizada para ser possível a retirada mais rápida das marcas da garra de cisalhamento.

Ao final do lixamento, os corpos de prova estavam prontos para serem utilizados no ensaio de Microdureza Vickers. Um exemplo do corpo de prova utilizado para o ensaio de Microdureza Vickers é mostrado na figura 30.

Figura 30 – Corpo de prova utilizado para o ensaio de microdureza Vickers.



Fonte: Autor.

4.6 Estampagem

A estampagem dos corpos de prova ou *blanks*, obtidos conforme descrito no item 4.5.1, foi realizada na prensa mecânica Gutmann 6895, com capacidade de 40 toneladas, mostrada na figura 31, em que foram posicionados e presos na parte superior da prensa o punção e na parte inferior da prensa a matriz utilizada para estampar os copos. Não foi feito o uso do prensa-chapas.

Figura 31 – Prensa mecânica Gutmann utilizada para confecção dos copos estampados.



Fonte: Autor.

O punção e a matriz utilizados são mostrados na figura 32 e figura 33 respectivamente, e o conjunto dos dois é mostrado na figura 34.

Figura 32 – Punção utilizado para confecção dos copos estampados.



Fonte: Autor.

Figura 33 – Matriz utilizada para confecção dos copos estampados.



Fonte: Autor.

Figura 34 – Conjunto matriz e punção utilizados para confecção dos copos estampados.



Fonte: Autor.

Foram estampadas seis chapas com apenas um golpe do punção, sendo destas, três tratadas termicamente e três não tratadas termicamente; e seis chapas com dois golpes do punção, sendo destas, três tratadas termicamente e três não tratadas termicamente. O punção foi abandonado, sempre da mesma altura de 200 mm: a um golpe foi abandonado apenas uma vez desta altura, e a dois golpes foi abandonado duas vezes, ou seja, a estampagem foi feita duas vezes. As chapas foram posicionadas sobre a matriz, uma por vez, como mostrado na figura 35, para realização da operação de estampagem.

Figura 35 – Posicionamento das chapas para posterior estampagem.



Fonte: Autor.

4.7 Ensaios mecânicos

4.7.1 Ensaio de Cisalhamento Planar Simples

O ensaio de cisalhamento planar simples foi realizado com uso de uma garra de cisalhamento montada na máquina de ensaios universais INSTRON 5582, conforme mostrado na figura 36.

Figura 36 – Máquina de ensaios universais Instron 5582 com a garra de cisalhamento adaptada.



Fonte: Autor.

Utilizou-se o extensômetro Instron, Modelo 2630-100 com 25 mm de abertura máxima e sistema de controle e aquisição de dados Blue Hill 2.

A taxa de deformação aplicada ($\dot{\epsilon}$) foi de $0,005 \text{ s}^{-1}$ sendo a velocidade do cabeçote da máquina de ensaios (v) [mm/min] determinada de acordo com a equação (8) (LOPES, 2009).

$$v = \dot{\epsilon} \times 60 \times w_{efetiva} \times F \quad (8)$$

Em que b é a largura efetiva submetida ao cisalhamento da peça e igual a 3,5 mm e F é o fator que representa um número empregado para a conversão das curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante em curvas de tensão efetiva – deformação efetiva. O valor de F utilizado foi previamente estabelecido por Rauch (1992), e equivale a $F = 1,84$, que representa uma estimativa da razão dos fatores de Taylor em tração (esforço de referência) e em cisalhamento.

Os corpos de prova foram presos a garra de cisalhamento com o uso do torquímetro Gedore Torcofix-K Rahsol (20-200 N.m) com 30 N.m de torque. A figura 37 indica o corpo de prova já preso a garra de cisalhamento, onde é possível perceber a largura efetiva do corpo de prova.

Figura 37 – Corpo de prova do ensaio de cisalhamento planar simples já preso a garra de cisalhamento.



Fonte: Autor.

Para construção das curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante, foram calculados os dados de deformação cisalhante ($\epsilon_{cisalhante}$) a partir dos dados obtidos pela máquina de ensaios, de acordo com a equação (9), em que “ $\epsilon_{extensômetro}$ ” é o valor de deformação informado pelo extensômetro, a abertura máxima é de 25 mm e “ $w_{efetiva}$ ” é a largura efetiva do corpo de prova (LOPES, 2009).

$$\epsilon_{cisalhante} = \frac{\epsilon_{extensômetro} \times 25}{100 \times w_{efetiva}} \quad (9)$$

E também foram calculados os dados de tensão cisalhante ($\sigma_{cisalhante}$) a partir dos dados obtidos pela máquina de ensaios, de acordo com a equação (10), em que P indica o valor da carga [N] e a expressão “(L × t)” indica área cisalhada (comprimento x espessura) [mm²] (LOPES, 2009).

$$\sigma_{cisalhante} = \frac{P}{(L \times t)} \quad (10)$$

Após a obtenção de todos os dados de tensão cisalhante e deformação cisalhante as curvas referentes para cada corpo de prova ensaiado foram traçadas. Porém, escolheu-se apenas uma curva para representação de cada condição avaliada.

4.7.2 Ensaio de Microdureza Vickers

O ensaio de Microdureza Vickers foi realizado utilizando o microdurômetro digital HMV-2 da marca SHIMADZU a uma ampliação de 400x. Foram realizadas dez medições em cada corpo de prova, num total de 16 corpos de prova, sendo aplicada uma carga de 0,3 kgf (2,942 N) e tempo de indentação de 15 segundos.

Neste ensaio as dez impressões foram feitas no meio do corpo de prova, de modo a garantir que estava sendo analisada a região cisalhada do material. Após cada impressão o equipamento retornava os resultados de microdureza mediante um software contido no neste. O valor médio de microdureza de cada corpo de prova foi obtido desconsiderando o valor mais alto obtido e o valor mais baixo obtido.

Para avaliação de cada condição estudada, escolheu-se apenas o valor médio representativo de uma amostra referente a tal condição.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

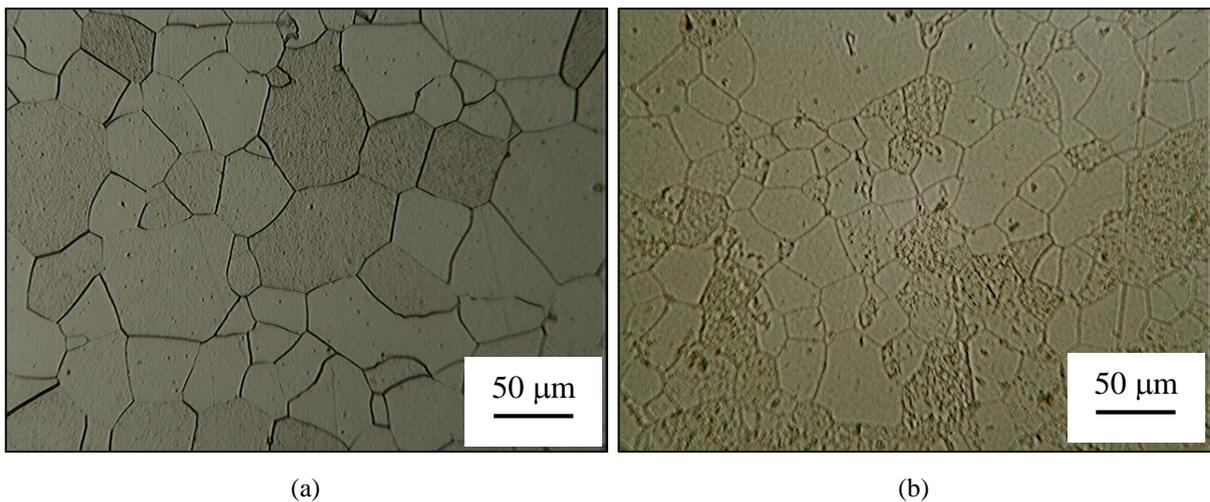
Esta seção apresenta os resultados obtidos para o aço inoxidável AISI 409 quanto a sua caracterização estrutural, por meio de microscopia óptica e difração de raios-X, e sua caracterização mecânica, por meio do ensaio de microdureza Vickers, tanto para o material no estado como recebido, quanto para o material após o tratamento térmico de recozimento. Em seguida, o resultado da estampagem do material é exposto. Por fim, o comportamento mecânico deste material é estudado mediante os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento planar simples e de microdureza Vickers, analisando os dados dos corpos de prova que foram previamente estampados com um golpe ou dois golpes e os que não foram estampados.

5.1 Caracterização do material

5.1.1 Caracterização estrutural

O aspecto microestrutural do aço AISI 409 no estado como recebido e após o tratamento térmico pode ser visualizado na figura 38, por meio das imagens obtidas com o microscópio óptico.

Figura 38 – Micrografias do aço inoxidável AISI 409 – microscópio óptico.



Fonte: Autor.

É possível identificar, tanto na figura 38(a) quanto na figura 38(b), a microestrutura típica do aço inoxidável ferrítico AISI 409 a temperatura ambiente: a ferrita (α).

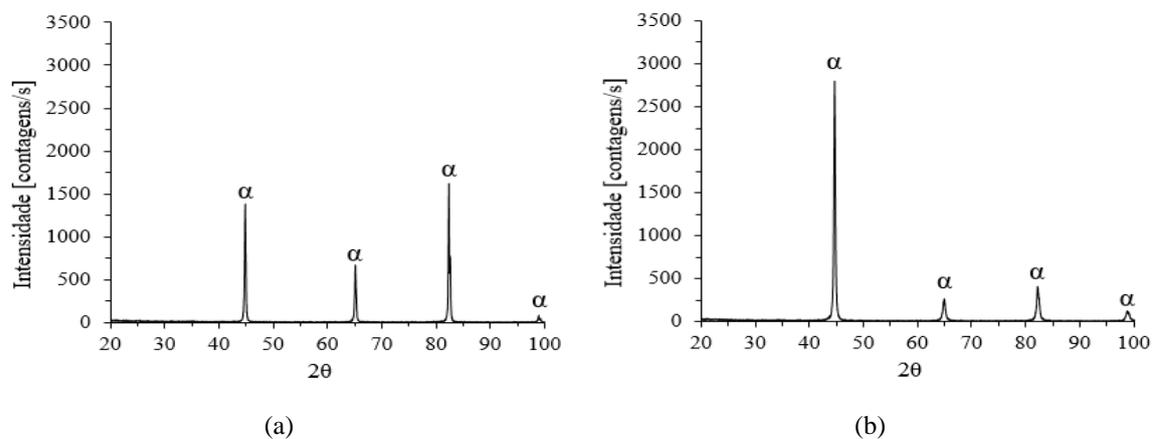
Percebe-se que os contornos de grão foram revelados para o aço no estado como recebido. Já para o aço tratado termicamente, verifica-se que alguns contornos de grão não foram completamente revelados, devido principalmente à dificuldade de preparação metalográfica desta amostra. Para ambas as condições, recebido e recozido, constata-se que os grãos de ferrita aparentam ser equiaxiais. Também é perceptível ao analisar ambas as imagens mostradas na figura 38 que houve uma diminuição do tamanho de grão após o tratamento térmico de recozimento.

Sabe-se que o contorno de grão atua como uma barreira para a continuação do movimento de discordâncias devido as diferentes orientações e descontinuidades presentes nesta região. Assim com a diminuição do tamanho de grão houve o aumento da área total de interface entre os grãos e, por consequência, o aumento da resistência mecânica do material. Dessa maneira, o refino de grão causado pelo tratamento térmico levou ao aumento da resistência mecânica e aumento de dureza para os materiais no estado recozido.

Na figura 39 são apresentados os difratogramas das amostras: como recebido (figura 39(a)) e após tratamento térmico (figura 39(b)). E para melhor visualização a figura 40 apresenta a junção dos difratogramas do estado recebido e recozido.

Confirmando o que foi verificado na micrografia, a identificação de fases pela difração de raios-X assinalou picos de intensidade, em função do ângulo de difração, característicos da fase ferrita (α).

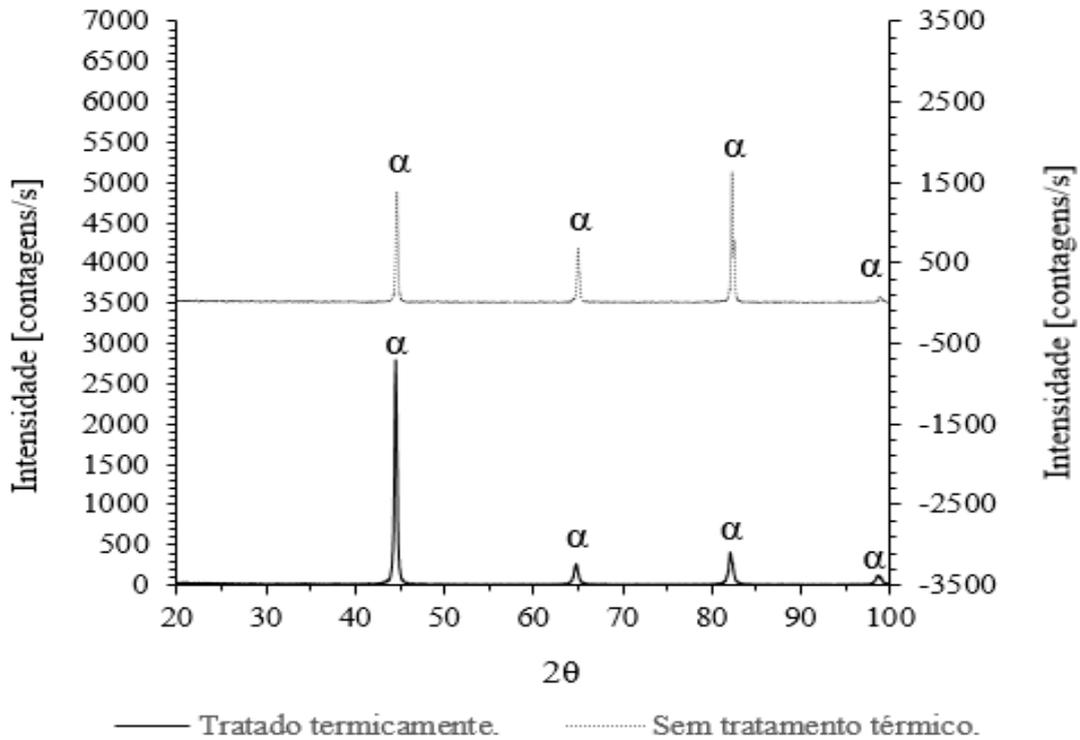
Figura 39 – Difratograma do aço inoxidável AISI 409.



(a) Estado como recebido; e (b) após tratamento térmico.

Fonte: Autor.

Figura 40 – Junção dos difratogramas obtidos para o aço inoxidável AISI 409.



Fonte: Autor.

Comparando-se os difratogramas do material no estado como recebido com o material tratado termicamente por recozimento observa-se que os picos de intensidade se coincidiram em termos do ângulo de difração.

5.1.2 Caracterização mecânica

A tabela 4 mostra o valor de dureza Vickers encontrado para o aço inoxidável AISI 409 no estado como recebido. O valor encontrado foi compatível com o dado indicado no catálogo técnico (APERAM, 2012), indicado na tabela 5, e representa a média dos valores encontrados no ensaio.

Tabela 4 – Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 409 – estado como recebido.

Dureza média no estado como recebido [HV]
129 ± 2,51

Fonte: Autor

Tabela 5 – Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 409 – informações técnicas.

Especificação dureza média na literatura [HV]
125

Fonte: APERAM, 2012

Já a tabela 6 expõe o valor de dureza Vickers encontrado para o material após o tratamento térmico. É perceptível o aumento de valor na dureza e, como já explicitado anteriormente, este aumento de dureza é resultante da diminuição do tamanho de grão após o tratamento térmico de recozimento, em relação ao aço AISI 409 no estado como recebido.

Tabela 6 – Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 409 – após tratamento térmico.

Dureza média do material após tratamento térmico [HV]
$151 \pm 2,17$

Fonte: Autor

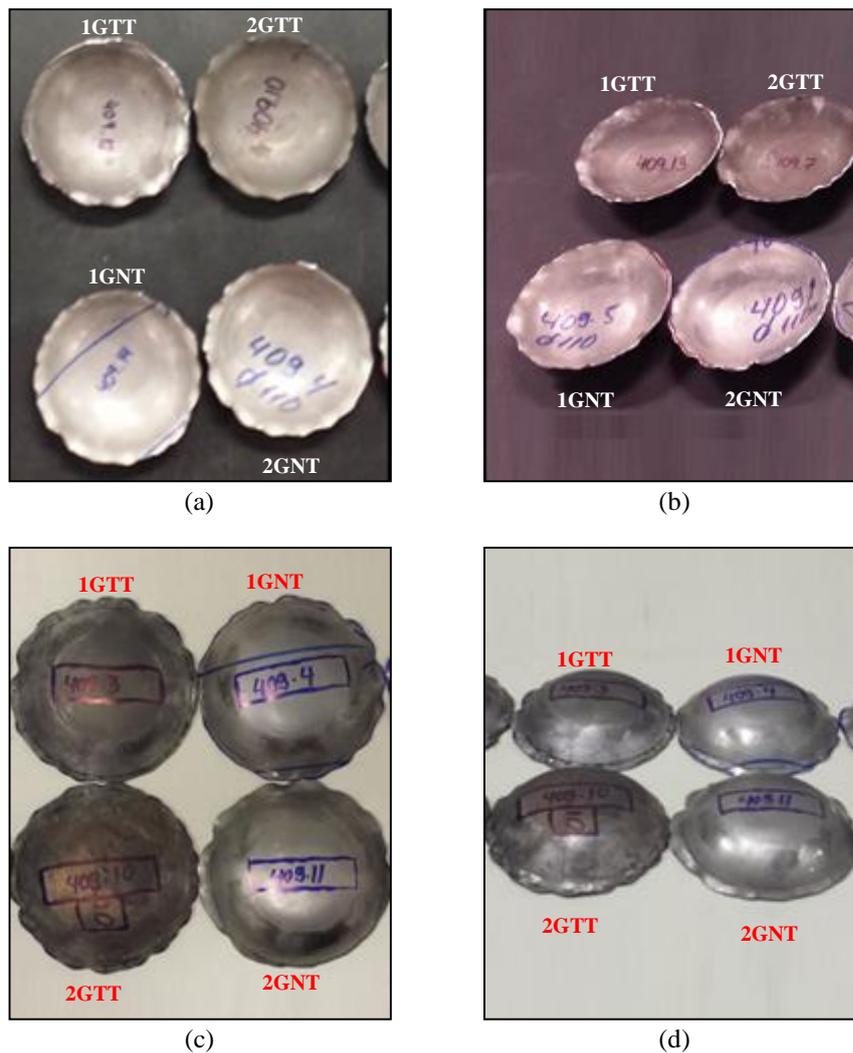
5.2 Estampagem

As imagens dos corpos de prova, tratados termicamente ou sem tratamento térmico, obtidos após a estampagem com um ou dois golpes podem ser visualizadas na figura 41. Os produtos estampados são identificados por: um golpe e não tratados termicamente – sigla 1GNT; um golpe e tratados termicamente – sigla 1GTT; dois golpes e não tratados termicamente – sigla 2GNT; e dois golpes e tratados termicamente – sigla 2GTT.

A profundidade do produto estampado encontrada foi de 18,50 mm, em média. Pela análise das imagens apresentadas na figura 41, pode-se dizer que o produto estampado com um golpe é similar ao produto estampado com dois golpes, em termos de profundidade e aparência. As propriedades mecânicas influenciadas pela estampagem com um ou dois golpes serão avaliadas no item 5.3.

Não foram observadas fissuras nos produtos estampados. Houve enrugamento das bordas destes devido a não utilização do prensa-chapas.

Figura 41 – Resultado da estampagem de *blanks* do aço inoxidável AISI 409.



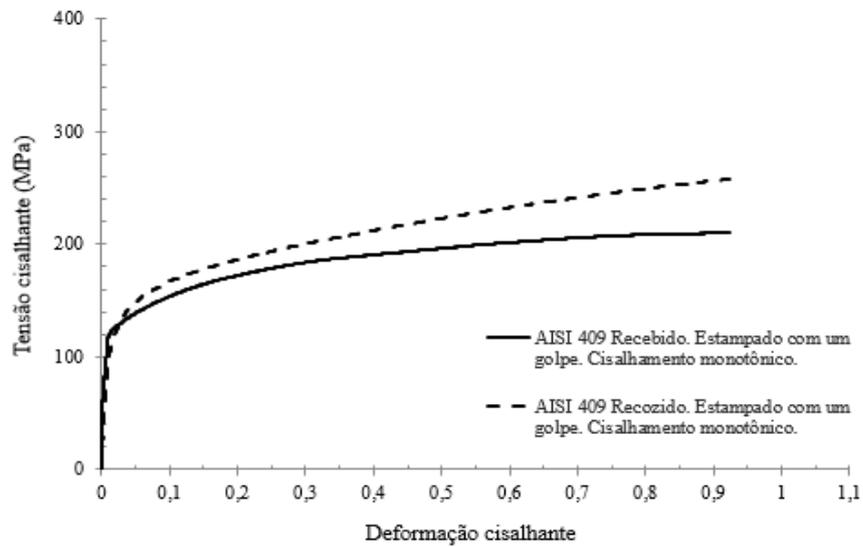
Fonte: Autor.

5.3 Ensaios mecânicos

5.3.1 Cisalhamento Planar Simples

A figura 42 mostra as curvas de tensão cisalhante - deformação cisalhante referentes ao carregamento monotônico em cisalhamento para o aço AISI 409 estampado com um golpe, variando a condição de tratado termicamente e sem tratamento térmico. Para a mesma condição de estampagem, de um golpe, constata-se que o material tratado termicamente apresenta resistência mecânica maior do que o aço não tratado termicamente, o que pode ser explicado pela diminuição do tamanho de grão para a condição de recozimento.

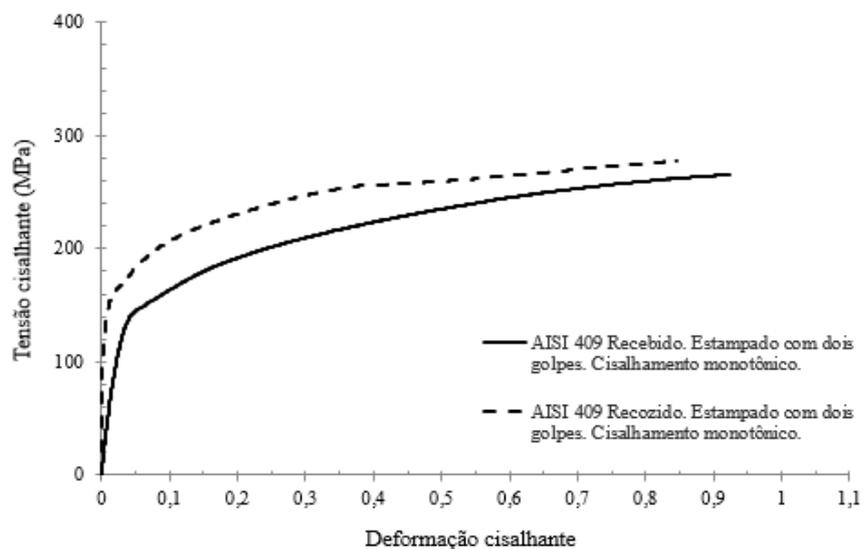
Figura 42 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 estampado com um golpe.



Fonte: Autor.

Avaliando a figura 43, que mostra as curvas de tensão cisalhante - deformação cisalhante referentes ao carregamento monotônico em cisalhamento para o aço AISI 409 estampado com dois golpes, depara-se com a mesma situação: a resistência mecânica do aço tratado termicamente é superior ao do aço sem tratamento térmico. A mesma explicação de tamanho de grão pode ser dada para este caso.

Figura 43 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 estampado com dois golpes.

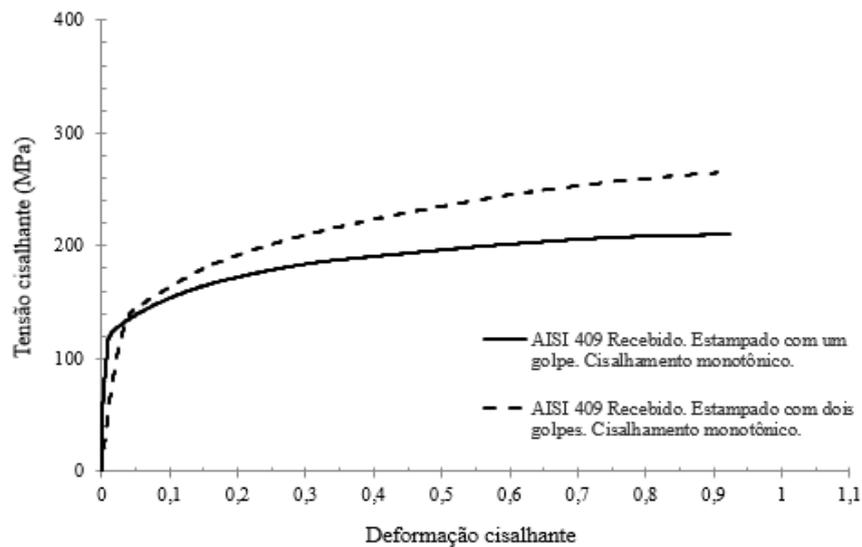


Fonte: Autor.

A comparação das curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante do aço AISI 409 para a mesma condição: corpos de prova sem tratamento térmico, pode ser visualizada na figura 44.

Para mesma condição, corpos de prova sem tratamento térmico, percebe-se que o material estampado com dois golpes apresenta resistência mecânica maior do que o aço estampado com apenas um golpe, o que pode ser explicado devido a deformação plástica maior a que o aço estampado em dois golpes foi submetido, acarretando em um maior encruamento deste e, portanto, um acréscimo da densidade de linhas de discordâncias.

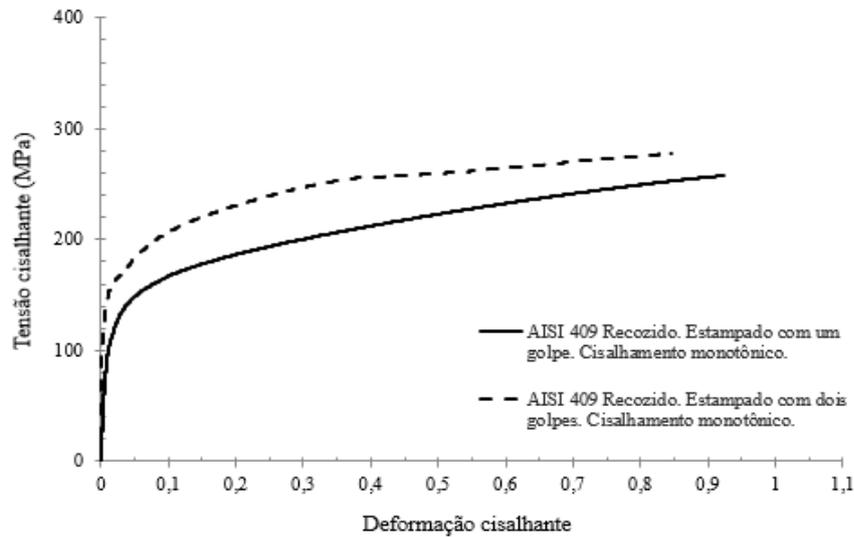
Figura 44 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 estampado e sem tratamento térmico.



Fonte: Autor.

O mesmo ocorre quando se confrontam as curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante referentes ao aço AISI 409 estampado e tratado termicamente, mostradas na figura 45: o aço estampado com dois golpes apresenta maior resistência mecânica do que o aço estampado com apenas um golpe, em que a mesma explicação de maior deformação plástica devido ao encruamento pode ser utilizada.

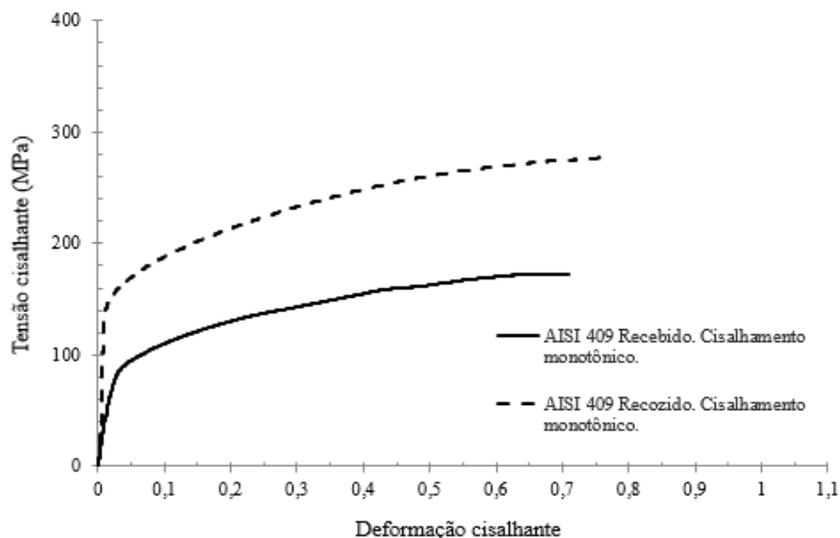
Figura 45 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 estampado e tratado termicamente.



Fonte: Autor.

A figura 46 apresenta as curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante para os corpos de prova que não foram estampados, apenas foram submetidos ao ensaio de cisalhamento planar simples, estando cada um em uma condição: um corpo de prova tratado termicamente e outro não tratado termicamente. Nesta situação, a mesma explicação dada quando foram comparadas as curvas dos corpos de prova estampados por número de golpes pode ser dada: o material tratado termicamente apresenta resistência mecânica maior do que o aço não tratado termicamente, devido a diminuição do tamanho de grão para a condição de recozido.

Figura 46 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 não estampado.

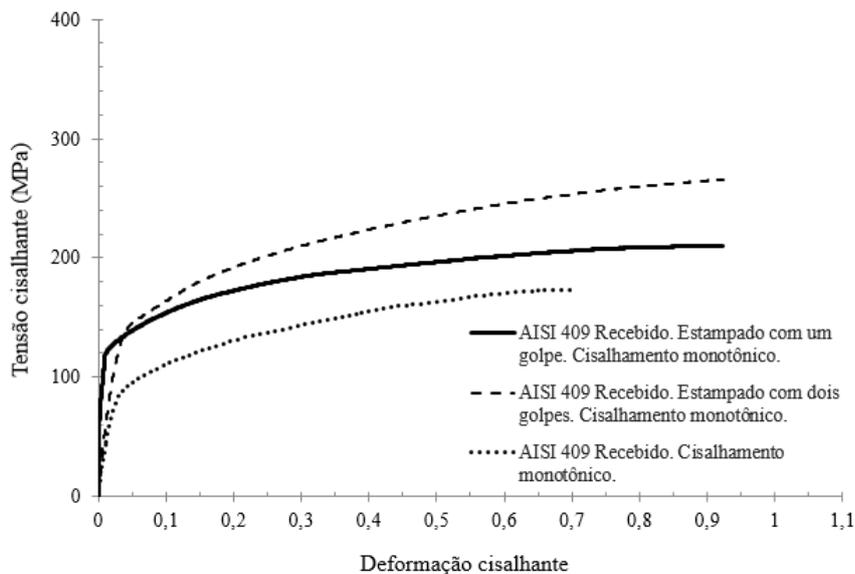


Fonte: Autor.

A comparação de todas as curvas tensão cisalhante – deformação cisalhante para os aços não tratados termicamente, pode ser visualizada na figura 47. Para os corpos de prova sem tratamento térmico de recozimento em laboratório, percebe-se que quanto maior a quantidade de deformação plástica experimentada pelo material (estampagem conduzida com dois golpes contra estampagem feita com um golpe), maior o endurecimento promovido pelo encruamento, sendo isso indicado pelo posicionamento das curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante, observando-se assim, o aumento da resistência mecânica do material.

Não se pode afirmar com exatidão a quantidade de deformação plástica que o material sofreu durante a estampagem, porém, pode-se dizer que sob dois golpes o material sofreu uma deformação maior do que em um golpe, esclarecendo o porquê a curva do material estampado com dois golpes representa uma maior resistência mecânica.

Figura 47 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 não tratado termicamente.

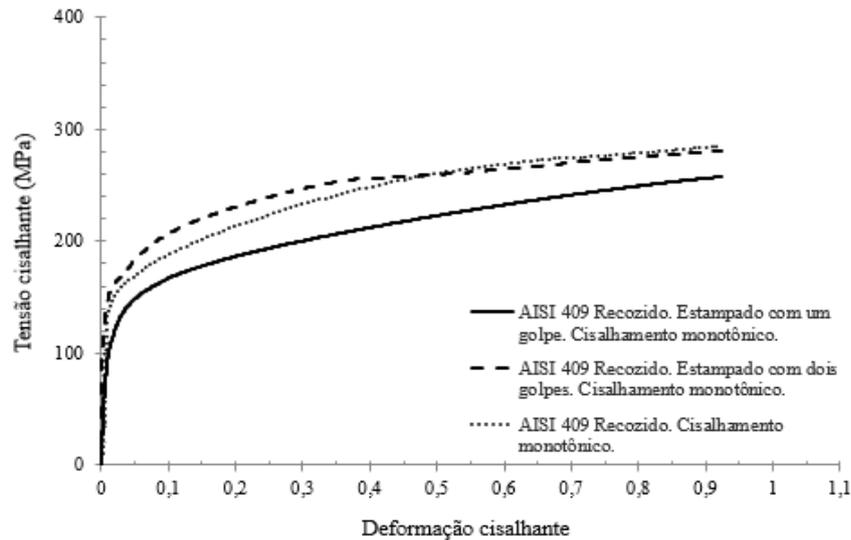


Fonte: Autor.

E na figura 48 pode ser visualizada a comparação de todas as curvas tensão cisalhante – deformação cisalhante para os aços tratados termicamente.

Para o material recozido e estampado por dois golpes nota-se, analisando a figura 48, um pequeno endurecimento deste quando comparado com o material recozido e estampado por um golpe, de modo análogo ao que foi observado para o material no estado como recebido, devido ao aumento do encruamento com o acréscimo da quantidade de deformação plástica entre um e dois golpes de estampagem.

Figura 48 – Curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante obtida para o aço AISI 409 não tratado termicamente.



Fonte: Autor.

Verifica-se também, na figura 48, que para o estado recozido, as curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante, do aço AISI 409, para um golpe de estampagem e para dois golpes de estampagem ficaram abaixo da curva referente ao carregamento monotônico em cisalhamento do material apenas recozido e sem estampagem, ocasionando assim, um amaciamento do material após a estampagem. Essa diferença de comportamento mecânico pode ser relacionada também com a mudança da orientação cristalográfica sofrida pelo material após a realização do tratamento térmico de recozimento que foi acentuada com a estampagem.

Comportamento mecânico similar foi observado por Lopes *et al.* (1999), com o alumínio AA 1050 quando se fez o cisalhamento a 0° , 45° e a 135° em relação à direção de laminação original das chapas e constatou-se o amaciamento apenas para a amostra cisalhada a 135° , sendo isso associado à mudança da textura do material, verificando-se a mesma subestrutura de linhas de discordâncias para as três condições de ensaio.

Como explicitado na figura 48, e também pelos valores de dureza que estão exibidos na tabela 7, observou-se que o recozimento endureceu o aço AISI 409 e este endurecimento reduziu a influência do encruamento decorrente da estampagem durante a realização do ensaio de cisalhamento.

5.3.2 Microdureza Vickers

Os resultados típicos obtidos em relação a propriedade mecânica de dureza são exibidos na tabela 7.

Nota-se que, assim como nas curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante, há um aumento da resistência mecânica para os aços tratados termicamente e para aqueles estampados com um maior número de golpes.

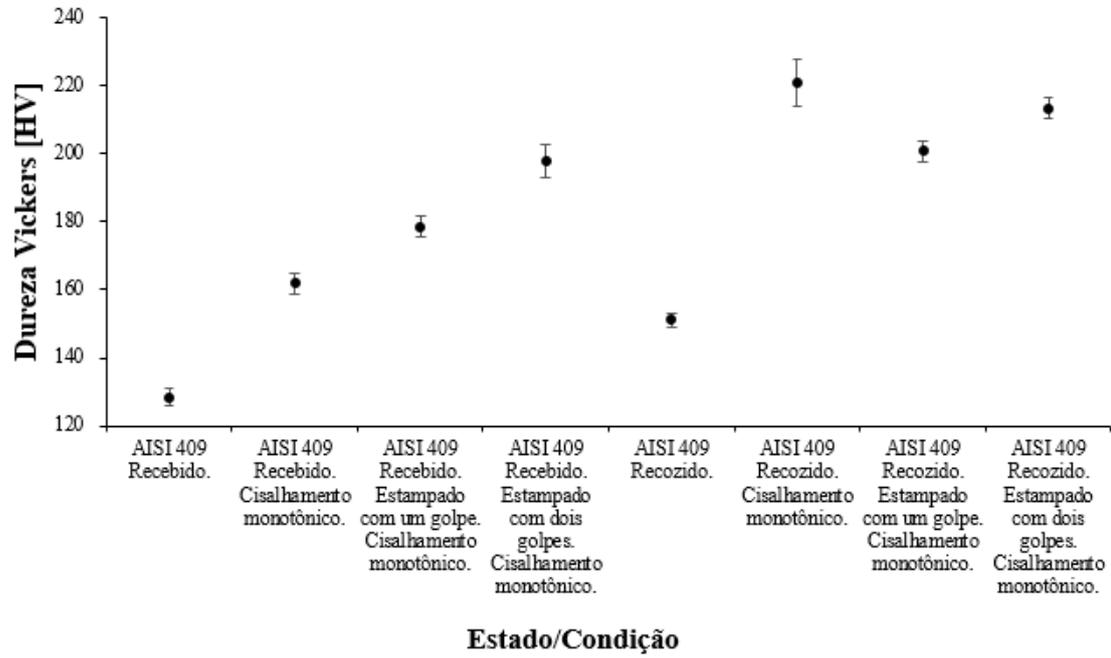
Tabela 7 – Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 409 – todas as condições de deformação plástica.

Estado/Condição	Dureza média do material [HV]
AISI 409 Recebido.	129 ± 2,51
AISI 409 Recebido. Cisalhamento monotônico.	162 ± 3,01
AISI 409 Recebido. Estampado com um golpe. Cisalhamento monotônico.	178 ± 3,02
AISI 409 Recebido. Estampado com dois golpes. Cisalhamento monotônico.	198 ± 4,81
AISI 409 Recozido.	151 ± 2,17
AISI 409 Recozido. Cisalhamento monotônico.	223 ± 6,81
AISI 409 Recozido. Estampado com um golpe. Cisalhamento monotônico.	201 ± 3,11
AISI 409 Recozido. Estampado com dois golpes. Cisalhamento monotônico.	213 ± 3,24

Fonte: Autor

Na figura 49, os resultados da tabela 7 podem ser visualizados de forma gráfica. O gráfico exibido na figura 49 torna mais clara a compreensão de que para o aço estampado com dois golpes e cisalhado encontra-se uma dureza superior em relação ao aço estampado com apenas um golpe e cisalhado, devido ao maior encruamento sofrido pelo material estampado por dois golpes. Já em relação ao material tratado termicamente, percebe-se que este apresenta maior valor de dureza devido à redução do tamanho de grão resultante do tratamento térmico de recozimento.

Figura 49 – Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 409 – todas as condições de deformação plástica.



Fonte: Autor.

6 CONCLUSÃO

O aço inoxidável ferrítico AISI 409 nos estados como recebido e recozido em laboratório foi estampado por um e por dois golpes em uma prensa sem uso do prensa-chapas. Posteriormente fez-se os ensaios de cisalhamento e de dureza, observando-se:

- a) A ausência de trincas após a estampagem do aço AISI 409 para ambos os estados iniciais;
- b) O endurecimento do material com o acréscimo da quantidade de deformação plástica durante a estampagem, observando-se uma maior resistência mecânica do aço estampado por dois golpes em relação ao aço estampado por apenas um golpe;
- c) O endurecimento maior do material no estado como recozido em laboratório e estampado quando comparado com o material no estado como recebido e estampado; e
- d) O endurecimento do material após a realização do recozimento como resultado da redução do tamanho de grão.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, I. J. B. **Projeto conceitual de um estampo de corte progressivo para chapas metálicas**. 2012. 65 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) Faculdade Horizontina – FAHOR, Horizontina, 2012. Disponível em: <http://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2012/Iralcio_Junior_Bastos_Amorim.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2014.

APERAM. **Kara ferritic stainless steel offer grade K09X**. Janvier, 2012. Disponível em: <http://www.aperam.com/uploads/stainlesseurope/TechnicalDataSheet/FT%20Automotive/Anglais/FT_K09X_UK.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2015.

ASHBY, M. F. **Engenharia de Materiais: uma introdução a propriedades, aplicações e projeto**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, v. 1, 2007.

ASM HANDBOOK. **Forming and Forging**. 3. ed. Ohio: American Society of Metal – ASM International, v. 14, 1993b.

ASM HANDBOOK. **Metallography and microstructures**. 5. ed. Ohio: American Society of Metal – ASM International, v.9, 1992.

ASM HANDBOOK. **Properties and Selection: irons, steels and high-performance alloys**. 2. ed. Ohio: American Society of Metal – ASM International, v.1, 1993a.

BOUVIER, S. *et al.* Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, n.1, p. 96-103, 2006.

BRESCIANI, E. **Conformação Plástica dos Metais**. São Paulo : EPUSP, 2011.

CARBÓ, H. M. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificação**. Acesita, 2001. Disponível em: <http://www.nucleinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/Acesita_Aplica_Especificica.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2014.

CAVAZOS, J. L.; GUERRERO-MATA, M. P.; ZAMBRANO, P. Annealing of a ferritic stainless steel 409 stabilized with titanium and zirconium additions. **Revista de metalurgia**, v. 47, n. 1, p. 38-47, 2011.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**. 2. ed. São Paulo: McGraw Hill, v. 1, 1986b.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, v. 2, 1986a.

CHOI, J.S. *et al.* Measurement and modeling of simple shear deformation under load reversal: Application to advanced high strength steels. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 98, p. 144-156, 2015.

CIMM. **A estampabilidade dos materiais metálicos.**[S.l.]: [s.n.], 1997. Disponível em: < http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6487-a-estampabilidade-dos-materiais-metalicos#.VY31zPIVikp>. Acesso em: 15 jul. 2014.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

COSTA, F. A. **Influência da Concentração de Carbono na Estampabilidade de Chapas de Aço Carbono.** 2014. 95 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Joinville, 2012. Disponível em: < <http://www.pergamum.udesc.br/dados-bu/000019/00001970.pdf> >. Acesso em: 10 jul. 2014.

DEARDO, I. A. **Mechanical behavior of IF 409 ferritic stainless steel.** 1998. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). McGill University. Montreal, 1998. Disponível em: < http://digitool.library.mcgill.ca/R/?func=dbin-jump-full&object_id=21287&local_base=GEN01-MCG02 >. Acesso em: 10 jul. 2014.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica.** 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

FARIA, R. A. **Efeito dos elementos Ti e Nb no comportamento em fadiga de aços inoxidáveis ferríticos utilizados no sistema de exaustão de veículos automotores.** 2006. 245f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006. Disponível em: < <http://repositorio.sisbin.ufop.br/handle/123456789/3347>>. Acesso em: 22 jul. 2014.

FOLLE, L. F. **Metodologia de medição do coeficiente de atrito em estampagem e avaliação da influência da lubrificação e condições superficiais via simulação numérica.** 2008. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/14790>>. Acesso em: 21 jun. 2014.

G'SELL, C. *et al.* Application of the simple shear test for determination of the plastic behaviour of solid polymers at large strains. **Journal of Materials Science**, v.18, p. 903–918, 1983.

GARCIA, A. *et al.* **Ensaio dos Materiais.** Rio de Janeiro: LTC, 2000.

HELMAN, H; CETLIN, P. R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais.** Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1993.

LOPES, A. B. *et al.* Textural vs structural plastic instabilities in sheet metal forming. **Acta materialia**, v. 47, n. 3, p. 859-866, 1999.

LOPES, W. **Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com o uso da técnica de cisalhamento planar simples.** 2009. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8DVHYY>>. Acesso em: 14 ago. 2014.

MAGALHÃES, F. D. C. **Estudo numérico e analítico das evoluções da força e da espessura em chapas de aço livre de intersticiais durante processamento por embutimento e ironing.** 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas

Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/SBPS-7B6HDY>>. Acesso em: 14 ago. 2014.

MIYAUCHI, K. A proposal of a planar simple shear test in sheet metals. **Sci. Papers Inst. Phys. Chem. Res. (Jpn)**, v. 78, p. 27–42, 1984.

NIEKERK, C. J. V.; TOIT, M. D. Sensitization behaviour of 11-12% Cr AISI 409 stainless steel during low heat input welding. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 111, n. 4, p. 243, 2011.

NOONING, R. G. **Effect of stabilizing elements on the precipitation behavior and phase stability of type 409 ferritic stainless steels**. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) University of Pittsburgh, Pittsburgh, 2002. Disponível em: <<http://d-scholarship.pitt.edu/10384/>>. Acesso em: 21 jun. 2014.

POLACK, A. V. **Manual Prático de Estampagem**. São Paulo: Hemus, 1974.

PONOMAREV, V. **Conformação de chapas: corte, dobramento, embutimento, estiramento**. Uberlândia: UFU, 2009.

RAUCH, E. F. Plastic anisotropy of sheet metals determined by simple shear tests. **Materials Science and Engineering**, v. A241, p. 179-183, 1998.

RAUCH, E. F. The flow law of mild steel under monotonic or complex strain path. **Solid State Phenomena**. V. 23 – 24. p. 317-334, 1992.

RAUCH, E. F.; G'SELL, C. Flow localization induced by a change in strain path in mild steel. **Materials Science and Engineering**. v. 111A, p. 71-80, 1989.

RICKHEY, F. *et al.* Evaluation of combined hardening coefficients of zircaloy-4 sheets by simple shear test. **Materials & Design**, v. 65, p. 995-1000, 2015.

ROSSI, M. **Estampado en Frio de La Chapa: Estampas, Matrices, Punzones, Prensa y Máquinas**. 9. ed. Madrid: Dossat, 1979.

SARDINHA, N. A. **Comparação da textura e propriedades mecânicas de um aço IF para estampagem resultante da laminação convencional e assimétrica**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia – IME, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/Dissertacao_Nina.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2014.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. 3. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2009.

SILVA, A. L. V. D. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

SOUZA, S. A. D. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1982.