



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
MAGNÉTICAS DE UM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**

Bernardo Vinícius Purper

Lajeado, dezembro de 2016

Bernardo Vinícius Purper

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
MAGNÉTICAS DE UM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Marcelo dos Santos Barretos

Lajeado, dezembro de 2016

Bernardo Vinícius Purper

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
MAGNÉTICAS DE UM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, na linha de formação específica em Ciências Exatas, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica:

Prof. Me. Marcelo dos S. Barretos - Orientador
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Dr. Ricson Rocha de Souza
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Me. Gabriel Birck
Centro Universitário UNIVATES

Lajeado, dezembro de 2016

RESUMO

O aço inoxidável austenítico é uma matéria prima de uso frequente por diversas indústrias e consequentemente, de forma direta ou indireta, está inserida na rotina das pessoas. Sua utilização, nos mais diversos segmentos, pode ser justificada pela combinação vantajosa de suas propriedades mecânicas, particularmente, a resistência à corrosão e à oxidação, soldabilidade e a resistência mecânica à quente. O processo de laminação dos aços é uma das etapas do seu processo de produção, e nesta etapa pode-se originar a anisotropia. Este trabalho buscou analisar e caracterizar por meio de ensaios mecânicos e magnéticos a influência da anisotropia nas propriedades mecânicas e magnéticas de um aço inoxidável AISI 304. As amostras extraídas de uma mesma chapa de aço inoxidável com 2 milímetros de espessura, foram utilizadas para a preparação dos corpos de prova. Dois corpos de prova foram submetidos à análise microestrutural conforme norma ASTM E3, outros quinze corpos de prova, obtidos em sentidos de laminação diferentes, sendo cinco no sentido da laminação, cinco à 45° da laminação e outros cinco perpendiculares ao sentido de laminação, foram submetidos à ensaio de tração, segundo norma ASTM E8 / E8M. As medições de variação do campo magnético foram executadas em quinze corpos de prova, também extraídos seguindo o mesmo critério do ensaio de tração, porém, passando pelo processo de deformação à frio com diferentes ângulos de dobra. Com os testes realizados, foram obtidos valores de limite de escoamento e de resistência à tração, conforme o sentido de laminação do material. As medições de variações do campo magnético mostram que em três corpos de prova, para alguns ângulos de dobra, combinados a um sentido de laminação específico, há magnetização na região afetada pela deformação à frio.

Palavras-chave: Laminação. AISI 304. Ensaio de tração. Campo magnético.

ABSTRACT

Austenitic stainless steel is a raw material frequently used by several industries and consequently, directly or indirectly, is part of the routine of people. Their use in the most diverse segments can be justified by the advantageous combination of their mechanical properties, particularly corrosion and oxidation resistance, weldability and hot mechanical strength. The process of rolling the steels is one of the stages of their production process, and in this step can cause anisotropy. This work aimed to analyze and characterize by means of mechanical and magnetic tests the influence of the anisotropy on the mechanical and magnetic properties of a stainless steel AISI 304. Samples extracted from the same stainless steel sheet with 2 millimeters thickness were used to prepare the specimens. Two test specimens were submitted to microstructural analysis according to ASTM E3, another fifteen specimens, obtained in different directions of lamination, five in the direction of lamination, five at 45° of the lamination and another five perpendiculars to the direction of lamination, were submitted To the tensile test according to ASTM E8 / E8M. The measurements of magnetic field variation were performed in fifteen specimens, also extracted following the same criterion of the tensile test, however, undergoing the cold deformation process with different angles of bending. With the tests carried out, values of flow limit and tensile strength were obtained, according to the lamination direction of the material. Measurements of magnetic field variations show that in three specimens, at some angles of bending, combined with a specific direction of rolling, there is magnetization in the region affected by the cold deformation.

Key words: Lamination. AISI 304. Traction test. Magnetic field.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Schaeffler	21
Figura 2 - Representação esquemática do processo de laminação	28
Figura 3 - Fluxograma do processo de fabricação dos aços	29
Figura 4 - Aço inoxidável austenítico AISI 304 solubilizado a 1050 °C, resfriado em água... 33	
Figura 5 - Aço austenítico AISI 304 forjado e solubilizado.....	33
Figura 6 - Esquema da máquina para ensaio de tração.....	35
Figura 7 - Gráfico da curva tensão vs deformação de engenharia.....	38
Figura 8 - Representação da estricção ou empescoamento.....	39
Figura 9 - Corpo de prova para ensaio de tração com seção circular	40
Figura 10 - Corpo de prova para ensaio de tração com seção retangular.....	40
Figura 11 - Representação esquemática de fraturas	43
Figura 12 - Comportamento do corpo de prova em ensaio de tração.....	44
Figura 13 - Fluxograma das etapas básicas para métodos e materiais	46
Figura 14 - Máquina de corte guilhotina Sorg.....	48
Figura 15 - Medidas do corpo de prova para análise metalográfica.....	48
Figura 16 - Máquina de corte a plasma Silber Cutter.....	49
Figura 17 - Extração dos corpos de prova para ensaio de tração	49
Figura 18 - Medidas do corpo de prova para ensaio de tração	50
Figura 19 - Posição e identificação dos corpos de prova para ensaio de tração.....	50
Figura 20 - Corpo de prova para ensaio magnético.....	51
Figura 21 - Dobradeira Hidráulica Sorg	51
Figura 22 - Corpos de prova para ensaio magnético	52
Figura 23 - Cortadeira metalográfica Teclago.....	53
Figura 24 - Corpos de prova para ensaio de micro dureza	54
Figura 25 - Embutidora Teclago.....	55
Figura 26 - Corpos de prova para análise metalográfica embutidos	55

Figura 27 - Lixadeira manual	56
Figura 28 - Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados.....	56
Figura 29 - Politriz lixadeira metalográfica Teclago.....	57
Figura 30 - Corpos de prova para análise metalográfica polidos	57
Figura 31 - Máquina para ensaio de tração Pantec	59
Figura 32 - Desenho esquemático para ensaio de anisotropia.....	61
Figura 33 - Gaussímetro Icel Manaus.....	62
Figura 34 - Procedimento de medição do campo magnético	62
Figura 35 - Microdurômetro Pantec	63
Figura 36 - Visão microscópica do ensaio de micro dureza.....	64
Figura 37 - Posição das indentações.....	64
Figura 38 - Micrografia longitudinal do corpo de prova.....	66
Figura 39- Micrografia transversal do corpo de prova	66
Figura 40 - Gráfico de Tensão vs Deformação para CP's A1 a A5	68
Figura 41 - Corpos de prova A1 a A5 rompidos	68
Figura 42 - Gráfico de Tensão vs Deformação para CP's C1 a C5.....	69
Figura 43 - Corpos de prova C1 a C5 rompidos.....	70
Figura 44 - Gráfico de Tensão vs Deformação para CP's E1 a E5	71
Figura 45 - Corpos de prova E1 a E5 rompidos	71
Figura 46 - Valores médios de LE e LR por sentido de laminação.....	72
Figura 47 - Gráfico dos perfis de micro dureza.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição típica e propriedades de aços inoxidáveis	20
Tabela 2 - Composição química, % em peso, e aplicações de alguns aços inoxidáveis martensíticos	22
Tabela 3 - Composição química, % em peso, e aplicações de alguns aços inoxidáveis austeníticos	23
Tabela 4 - Composição química, % em peso, e aplicações de alguns aços inoxidáveis ferríticos.....	24
Tabela 5 - Composição química do aço inoxidável AISI 304, % em peso	25
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304	26
Tabela 7 - Dimensões dos corpos de prova	40
Tabela 8 - Classificação de chapas por espessura	41
Tabela 9 - Composição química da amostra.....	65
Tabela 10 - Valores de LE, LR e alongamento para cada corpo de prova	67
Tabela 11 - Índices de anisotropia.....	73
Tabela 12 - Medições de variação do campo magnético.....	74
Tabela 13 - Valores de micro dureza.....	75

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	[m ²]	Área da seção transversal inicial
b_0	[mm]	Largura inicial do corpo de prova
b_{01}	[mm]	Primeira largura inicial do CP para anisotropia
b_{02}	[mm]	Segunda largura inicial do CP para anisotropia
b_{03}	[mm]	Terceira largura inicial do CP para anisotropia
b_1	[mm]	Largura do corpo de prova após ensaio
b_{11}	[mm]	Primeira largura final do CP para anisotropia
b_{12}	[mm]	Segunda largura final do CP para anisotropia
b_{13}	[mm]	Terceira largura final do CP para anisotropia
Δl	[mm]	Variação do comprimento sob a força
Δr	[-]	Anisotropia planar
ε	[mm/mm]	Deformação de engenharia
F	[N]	Carga aplicada
l_0	[mm]	Comprimento útil inicial do CP
L_0	[mm]	Comprimento útil inicial do CP para anisotropia
l_1	[mm]	Comprimento útil do CP após ensaio
L_1	[mm]	Comprimento útil do CP após ensaio anisotropia
r	[-]	Índice de anisotropia
r_m	[-]	Anisotropia média
s_1	[mm]	Espessura do corpo de prova após ensaio
s_0	[mm]	Espessura inicial do corpo de prova
σ	[Pa]	Tensão de engenharia
φ	[-]	Deformação verdadeira ou real

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de Prova
CNC	Comando Numérico Computadorizado
ET	Ensaio de Tração
HV	Hardness Vickers
LE	Limite de Escoamento
LME	Limite Médio de Escoamento
LMR	Limite Médio de Resistência
LR	Limite de Resistência
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
SEW	Ermittlung der senkrechten Anisotropie

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Tema	14
1.2	Objetivo geral	15
1.3	Objetivos específicos	15
1.4	Justificativas	15
1.5	Resultados esperados	15
1.6	Delimitação do trabalho.....	16
1.7	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1	Aços inoxidáveis	17
2.1.1	Aplicações dos aços inoxidáveis	21
2.1.2	Aço inoxidável AISI 304.....	25
2.1.2.1	Comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 304.....	26
2.2	Conformação mecânica	26
2.2.1	Laminação	27
2.2.1.1	Processo de fabricação da chapa de aço inoxidável AISI 304	28
2.3	Anisotropia dos materiais metálicos.....	29
2.4	Análise metalográfica	31
2.5	Propriedades mecânicas e magnéticas.....	34
2.5.1	Ensaio de tração.....	34
2.5.1.1	Corpos de prova para ensaio de tração	39
2.5.2	Fratura dúctil	42
2.5.3	Magnetismo dos aços	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	Corpos de prova.....	47
3.1.1	Corpos de prova para análise metalográfica.....	47
3.1.2	Corpos de prova para ensaio de tração	48
3.1.3	Corpos de prova para ensaio magnético	51
3.1.4	Corpos de prova para ensaio de micro dureza.....	53
3.2	Análise Metalográfica.....	54
3.2.1	Corte	54
3.2.2	Embutimento	55

3.2.3	Lixamento.....	56
3.2.4	Polimento.....	56
3.2.5	Ataque Químico.....	58
3.2.6	Observação Microestrutural e Análise Química.....	58
3.3	Ensaio Mecânicos e Magnéticos	58
3.3.1	Ensaio de Tração	59
3.3.2	Ensaio de Anisotropia.....	60
3.3.3	Ensaio Magnético	61
3.3.4	Ensaio de Micro Dureza	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	Análise Química e Metalográfica.....	65
4.2	Ensaio de Tração	67
4.3	Índices de Anisotropia	73
4.4	Ensaio Magnético	74
4.5	Ensaio de Micro Dureza	75
5	CONCLUSÕES.....	77
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	78
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis representam boa parte dos diferentes tipos de aços produzidos e consumidos no mundo. Eles estão diretamente ligados ao nosso dia a dia, seja na indústria, nos automóveis produzidos pelas montadoras ou em um simples eletrodoméstico que possuímos em nossas residências. Ainda, possuem uma gama variada de composições químicas, de estrutura cristalina, de comportamento mecânico, magnético e de resistência à oxidação e à corrosão.

Os aços inoxidáveis são importantes para a engenharia em função de suas propriedades mecânicas em temperaturas elevadas, pelas propriedades magnéticas, pela tenacidade de algumas ligas e também por sua resistência à corrosão e oxidação. Colpaert (2008) também cita que a microestrutura tem influência predominante no desempenho dos aços inoxidáveis, sendo dependente da composição química e do tratamento térmico ao qual o material possa ser submetido.

São classificados como inoxidáveis os aços que possuem em sua composição química pelo menos 10 a 12 % de cromo. Geralmente essa concentração equivale ao mínimo necessário para assegurar uma razoável resistência à corrosão em contato com a atmosfera. Para Modenesi (2001), os aços inoxidáveis estão divididos basicamente em aços martensíticos, ferríticos, austeníticos, duplex e endurecíveis por precipitação, no qual a composição química irá definir a qual grupo um determinado aço inoxidável irá pertencer. Os aços inoxidáveis austeníticos, como o AISI 304, se destacam com relação às propriedades mecânicas, soldabilidade, conformação e resistência à corrosão. Além disso, representam aproximadamente 60 a 70 % da produção total de aços inoxidáveis no mundo.

Nos aços inoxidáveis, a resistência mecânica e as propriedades magnéticas podem ser diferentes com a direção analisada, isto é, podem ser aços anisotrópicos. Dieter (1981) explica

que existem duas maneiras de se observar a anisotropia em metais, por fibramento mecânico ou por anisotropia cristalográfica. Para avaliar os índices de anisotropia, normalmente é realizado ensaio de tração em diferentes corpos de prova, extraídos nas orientações longitudinal, transversal e a 45° do sentido de laminação, onde é analisada a deformação na largura e na espessura dos corpos de prova antes e após o ensaio de tração.

Para verificar e confirmar o sentido de laminação de um material metálico é importante realizar o ensaio metalográfico em uma amostra. A análise metalográfica consiste basicamente em uma análise microscópica da microestrutura do material em estudo, e para isso, Colpaert (2008) cita que cuidados e uma sequência de etapas devem ser adotados para obter-se um bom resultado no ensaio metalográfico.

Tendo conhecimento do sentido de laminação do material, os corpos de prova para o ensaio de tração e para medição da variação do campo magnético podem ser extraídos. O uso do ensaio de tração para a obtenção das propriedades e características mecânicas de um material é muito utilizado pela engenharia, pois é de fácil execução e pode ser reproduzido inúmeras vezes para a confirmação dos dados. Segundo Garcia et al.(2000), com o ensaio de tração é possível determinar o limite de resistência a tração, coeficiente de resistência, limite de escoamento, coeficiente de encruamento, módulo de elasticidade, ductibilidade, módulo de tenacidade e módulo de resiliência.

Deste modo, este trabalho apresenta ensaios mecânicos e magnéticos com corpos de prova de aço inoxidável AISI 304, a fim de identificar e comparar as propriedades mecânicas e magnéticas deste material a partir da extração com diferentes orientações, no que se refere ao sentido da laminação.

1.1 Tema

O tema deste trabalho é a influência da anisotropia no comportamento mecânico e magnético de um aço inoxidável AISI 304.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar e verificar por meio de ensaios mecânicos e magnéticos a existência de influência da anisotropia no limite de escoamento, na resistência à tração e no magnetismo do aço inoxidável AISI 304.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Estudar o comportamento mecânico e magnético dos aços inoxidáveis, a fim de assimilar e compreender de forma clara as características deste tipo de material;
- Realizar análise metalográfica, ensaios de tração e medições de variação do campo magnético após deformação a frio dos corpos de prova;
- Explorar os resultados da análise de microestrutura, do ensaio de tração e de variação do campo magnético.

1.4 Justificativas

Por ser um material amplamente utilizado na indústria metal mecânica, avaliar o comportamento mecânico e magnético do aço inoxidável AISI 304 pode contribuir para um melhor desempenho deste material em aplicações específicas à necessidade de cada empresa. E essas propriedades podem diferenciar em função do sentido de laminação do material, por isso a importância de avaliar a influência da anisotropia no aço inoxidável AISI 304.

1.5 Resultados esperados

Pretende-se, com este trabalho, determinar em qual sentido de laminação do material pode-se obter maior resistência a tração, maior limite de escoamento e maior alteração do campo magnético após deformação a frio.

1.6 Delimitação do trabalho

Considerando-se que o aço inoxidável AISI 304 é um material que representa uma boa fatia do mercado dos aços inoxidáveis no Brasil, decidiu-se estudar e avaliar em testes de laboratório as propriedades mecânicas e magnéticas deste material.

Os testes foram realizados no Laboratório de Ensaaios Mecânicos da Univates, localizada no estado do Rio Grande do Sul. O período do desenvolvimento deste trabalho foi de Março de 2016 a Novembro de 2016.

1.7 Estrutura do trabalho

Este trabalho apresenta cinco capítulos, sendo que o capítulo um refere-se à introdução do trabalho, onde também constam o tema, objetivos gerais e específicos, justificativas, resultados esperados, delimitação e estrutura do trabalho. No segundo capítulo, a revisão bibliográfica dos tópicos abordados no trabalho é apresentada. No capítulo três, os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento e obtenção dos resultados são abordados. No capítulo quatro, os resultados obtidos são apresentados. No capítulo cinco, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são discutidas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

No decorrer deste capítulo abordam-se, de forma objetiva e clara, tópicos considerados importantes para a fundamentação teórica deste trabalho. Em meio a todos os tópicos, destacam-se: aços inoxidáveis, comportamento mecânico e magnético do aço inoxidável AISI 304, anisotropia dos materiais metálicos, análise metalográfica e ensaio de tração.

2.1 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são muito utilizados em aplicação de engenharia, pois apresentam boas propriedades mecânicas mesmo em temperaturas elevadas e possuem boa resistência à corrosão e à oxidação.

Comparado com outros tipos de ligas de aço, o aço inoxidável é um material que surgiu recentemente, mais precisamente no início do século XX em países como a Alemanha, Inglaterra, Estados Unidos e França. E com a evolução dos processos de fabricação de ligas metálicas, foi possível a elaboração de diferentes aços inoxidáveis com variadas composições químicas, propriedades mecânicas e microestruturas (MODENESI, 2001). Para Silva (2006), normalmente são classificados como aços inoxidáveis, aços que possuem teores de cromo superiores a 12 %. O cromo é responsável pelo aumento da resistência a corrosão e à oxidação dos aços inoxidáveis.

Entretanto, nenhum material é completamente inoxidável, no sentido da palavra, e muita atenção deve ser dada à correta seleção do material para aplicações em meios corrosivos; o aço ao carbono comum, por exemplo, pode apresentar resultados superiores a um aço “inoxidável”, inadequadamente selecionado (SILVA, 2006, p 408).

No início do século XX, de forma acidental, foram desenvolvidas as composições mais comuns de aços inoxidáveis. Formulações com 12 % de cromo e 12 % de cromo mais 8 % de níquel são algumas delas. Com base nestas composições, avaliou-se os diferentes efeitos

causados por elementos de liga e residuais, como carbono, nitrogênio e molibdênio (SILVA, 2006). As diferentes combinações nas composições químicas dos aços inoxidáveis favoreceram a criação de aços com propriedades mecânicas totalmente distintas. E segundo Silva (2006), existem cinco classificações para os aços inoxidáveis:

- Martensíticos

Geralmente, possuem teor de carbono acima de 0,1 %, sendo denominadas ligas de ferro e com variação de 11 % a 18 % de cromo. Ligas que possuem teor de carbono menor que 0,1 % e elementos residuais reduzidos, estão sendo estudados e são chamados de “supermartensíticos”. Composições deste tipo interrompem o campo austenítico no diagrama de fases, deste modo, com tratamento térmico de têmpera podem ser endurecidos. Estas ligas são magnéticas e estão inseridos neste grupo os aços: (AISI) 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440A, B e C, 501. Também existem os aços martensíticos-austeníticos ou martensíticos-ferríticos, que são classes intermediárias incluídas no grupo dos aços martensíticos, que são composições com maior teor de níquel, que permitem alcançar endurecimento parcial por tratamento térmico de têmpera. Os aços martensíticos e também os supermartensíticos estão sendo aplicados em tubulações da indústria petrolífera, onde a resistência mecânica, a resistência a corrosão e a soldabilidade são características essenciais.

- Ferríticos

São ligas basicamente ferríticas em qualquer temperatura e quando tratadas termicamente por têmpera, não endurecem. Possuem teores mais elevados de cromo em relação aos aços martensíticos e teores de carbono reduzidos. Fazem parte deste grupo os aços: (AISI) 405, 430, 430F, 446, 502. São aços que possuem boa resistência a corrosão, especificamente a trincas de corrosão sob tensão e de tenacidade média a baixa. Sua resistência a oxidação se dá aos elevados teores de cromo em suas composições e a ausência de níquel melhora seu desempenho em locais contendo enxofre a temperaturas elevadas. Porém, eles são aços com baixa resistência ao impacto e apresentam dificuldades relacionadas à soldagem.

- Austeníticos

São ligas constituídas por ferro, e teores de cromo variando entre 16 % e 30 % e de níquel alternando entre 8 % e 35 %. Não são aços magnéticos e incluem-se neste grupo os aços: (AISI) 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 316L, 317, 321 e 347. Em geral, o teor de carbono está abaixo de 0,08 % e em alguns casos o níquel presente em sua composição pode

ser substituído por manganês ou nitrogênio, por questões de redução de custo. Também têm sido desenvolvidos aços com maiores teores de elementos de liga, chamados de “superausteníticos”. São os aços mais comuns entre a família dos aços inoxidáveis, pois apresentam boa resistência a corrosão, boa soldabilidade e elevada tenacidade.

- Ferrítico-austeníticos (duplex)

São ligas contendo austenita e ferrita em sua microestrutura em quantidades praticamente iguais. São composições de ferro, 18 % a 27 % de cromo, 4 % a 7 % de níquel, 1 % a 4 % de molibdênio e outros elementos de liga como o nitrogênio. São ligas que possuem um teor menor de níquel em relação aos aços austeníticos e mesmo assim suas propriedades mecânicas e de corrosão são superiores aos aços citados anteriormente. Estão neste grupo os aços: AISI 329, UNS S32304 e S31803.

- Endurecidos por precipitação

São ligas de ferro, com teores de cromo variando de 12 % a 17 %, níquel de 4 % a 8 % e com até 2 % de molibdênio. Estas ligas, com adições, possibilitam o endurecimento da martensita de baixo carbono pela queda de compostos intermetálicos, como o alumínio, cobre, titânio e/ou nióbio.

Para Chiaverini (2008), a classificação dos aços inoxidáveis é fundamentada pela sua microestrutura à temperatura ambiente, sendo classificados em dois grandes grupos. Os que são de uso mais generalizado, se enquadram na classificação de aços inoxidáveis martensíticos, ferríticos e austeníticos. Os que são classificados como duplex endurecidos por precipitação e nitrônicos, também são importantes, mas seu uso é menos frequente. Também, para Askeland (2013), a classificação dos aços inoxidáveis é baseada na estrutura cristalina e pelos mecanismos de endurecimento. Estão elencados primeiramente como martensíticos, austeníticos e ferríticos, e após são citados os aços inoxidáveis endurecido por precipitação e os duplex. A composição química e as propriedades para alguns destes aços inoxidáveis, pode ser observada conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Composição típica e propriedades de aços inoxidáveis

Aço	% C	% Cr	% Ni	Outros	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Condição
Austenítico:								
201	0,2	17	5	6,5% Mn	655	310	40	Recozido
304	0,1	19	10		517	207	30	Recozido
					1276	965	9	Encruado
304L	0	19	10		517	207	30	Recozido
316	0,1	17	12	2,5% Mo	517	207	30	Recozido
321	0,1	18	10	0,4% Ti	586	241	55	Recozido
347	0,1	18	11	0,8% Nb	621	241	50	Recozido
Ferrítico:								
430	0,1	17			448	207	22	Recozido
442	0,1	20			517	276	20	Recozido
Martensítico:								
416	0,2	13		0,6% Mo	1241	965	18	Temperado e revenido
431	0,2	16	2		1380	1034	16	Temperado e revenido
440C	1,1	17		0,7% Mo	1965	1896	2	Temperado e revenido

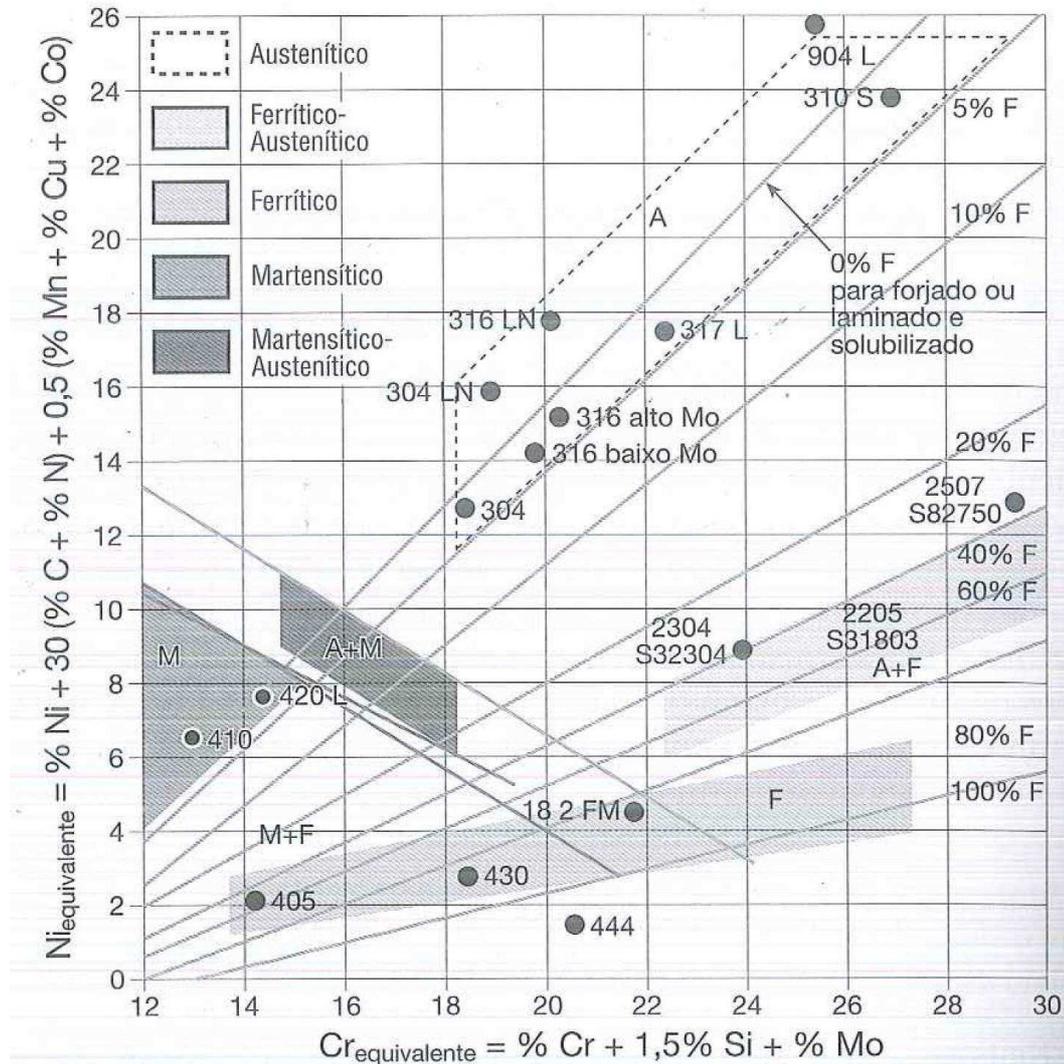
Fonte: Adaptado de Askeland, (2013, p. 404).

O desempenho dos aços inoxidáveis passa pela influência direta de sua microestrutura. Composição química e tratamento térmico interferem em todos os aspectos estruturais do material. Abaixo tem-se o diagrama de Schaeffler, conforme Figura 1, que mostra as faixas de composição aproximadas para cada grupo de aços inoxidáveis.

As composições com teores variados de cromo e níquel dão origem às diferentes ligas expostas no diagrama de Schaeffler, que é formado por cinco famílias, sendo elas a austenítica, ferrítica-austenítica, ferrítica, martensítica e martensítica-austenítica. O diagrama se divide em quadrantes com elevações de 2 % dos teores de cromo e níquel a cada quadrante. Neste diagrama, as ligas austeníticas são as que apresentam em sua composição química os maiores teores de níquel e cromo.

No diagrama de Schaeffler, observa-se que o aço inoxidável da classe 304 está posicionado no quadrante de 18 a 20 % de cromo e 12 a 14 % de níquel, pertencendo a família dos aços austeníticos. A família dos aços austeníticos ainda apresenta os aços inoxidáveis da classe 304L 316, 316L, 317L e 310S.

Figura 1 - Diagrama de Schaeffler



Fonte: Colpaert, (2008, p. 524).

2.1.1 Aplicações dos aços inoxidáveis

O aço inoxidável está presente na rotina das pessoas no mundo inteiro, seja no trabalho, nas residências ou no lazer. Callister (2014) cita que a vasta diversidade de propriedades mecânicas, vinculadas a uma excelente resistência à corrosão, fazem dos aços inoxidáveis um material ideal para diversas aplicações. Alguns aços inoxidáveis são utilizados em ambientes severos e com temperaturas elevadas, já que suas propriedades mecânicas e a resistência à corrosão permitem seu uso nestas condições. Turbinas a gás, aeronaves e caldeiras de vapor são alguns dos exemplos de uso em condições extremas para este material. Aperam (2013) afirma que, por ser um material muito versátil, sua aplicação se enquadra em

diversas áreas, seja na indústria, nas utilidades domésticas, nos meios de transporte e na construção civil.

Como apresentado no tópico anterior, os aços inoxidáveis estão divididos em grupos, sendo os principais: martensíticos, austeníticos e ferríticos. Em cada um destes grupos existem diferentes tipos de aços inoxidáveis e sua utilização é segmentada conforme sua composição química. Na Tabela 2, estão listadas algumas ligas de aços inoxidáveis martensíticos, com suas características, propriedades e onde normalmente são utilizadas.

Tabela 2 - Composição química, % em peso, e aplicações de alguns aços inoxidáveis martensíticos

Tipo AISI	C	Cr	Outros Elementos	Propriedades Gerais e Aplicações Típicas
405	0,08	11,5 13,5	Al: 0,10 a 0,30	Não endurecidos devido à presença de Al; para tubos irrigadores, caldeiras, recipientes para indústria petrolífera, etc.
406	0,15	12,0 14,0	Al: 3,50 a 4,50	Não endurecível devido à presença de Al, resistente à oxidação a altas temperaturas; para resistências elétricas, etc.
409	0,08	10,5 11,75	Ti: 6x%C min.	Não endurecível devido à presença de Ti, para sistema de exaustão de automóveis.
430	0,12	14,0 18,0	-	É o tipo mais comum deste grupo por ser de conformação muito fácil; muito usado em equipamentos para indústria química, equipamentos para restaurantes, cozinhas, adornos de automóveis, decoração, peças de fornos, etc.
430F	0,12	14,0 18,0	P, S e Se: 0,07 min.	Variedade de usinagem fácil; para parafusos, porcas, ferragens, etc.
442	0,2	18,0 23,0	-	Para serviço a alta temperatura, quando não se exige facilidade de fabricação, para partes de fornos, etc.
443	0,2	18,0 23,0	Cu: 0,90 a 1,25 Si: 0,75 max. Ni: 0,50 max.	Alta resistência à corrosão; para equipamento químico e aplicações em altas temperaturas, partes de fornos, etc.
446	0,2	23,0 27,0	N: -,25 max.	Dentre as ligas Fe-Cr é o que apresenta melhor resistência à corrosão e a oxidação até temperaturas de 1150°C; para peças de fornos, queimadores, radiadores, etc.

Fonte: Adaptado de Modenesi, (2001, p. 6)

Na Tabela 3, têm-se exemplos de ligas austeníticas, também com suas características, propriedades e aplicações típicas.

Tabela 3 - Composição química, % em peso, e aplicações de alguns aços inoxidáveis austeníticos

Tipo AISI	C	Cr	Ni	Outros Elementos	Propriedades Gerais e Aplicações Típicas
301	0,15	16,0 18,0	6,0 8,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Tipo para aplicações gerais; boa trabalhabilidade; ornamentação, utensílios domésticos, fins estruturais; equipamento para indústria química, naval, alimentícia, transportes, etc.
302	0,15	17,0 19,0	8,0 10,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Idem para aplicações decorativas ou de resistência à corrosão como as indicadas para o tipo 301.
302B	0,15	17,0 19,0	8,0 10,0	Si: 2,0 a 3,0 Mn: 2,0 max.	Melhor resistência a formação de camada de óxido a altas temperaturas devida à presença de Si.
303	0,15	17,0 19,0	8,0 10,5	P/S/Se: 0,07 min. Zr/Mo: 0,60 max. Si: 1,0 max. Mn: 2,0 max.	Tipo 18:8 de usinagem fácil, para eixos, parafusos, porcas, peças de carburadores, etc.
304	0,08	18,0 20,0	8,0 11,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Tipo 18:8 de C mais baixo, soldável com menor perigo de corrosão intercrystalina, mesmas aplicações dos tipos 301 e 302.
308	0,08	19,0 21,0	10,0 12,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Maior resistência à corrosão que o 18:8; para consumíveis de soldagem, entre outras aplicações.
309	0,2	22,0 24,0	12,0 15,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Boa resistência à oxidação e mecânica a altas temperaturas; para equipamentos de indústria química, peças de fornos, estufas, etc.
309S	0,08	22,0 24,0	12,0 15,0	Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Devido ao baixo C, permite soldagem com menor perigo de corrosão intercrystalina.
310	0,25	24,0 26,0	19,0 22,0	Mn: 2,0 max. 1,5 max.	Boa estabilidade nas temperaturas de soldagem, consumíveis de soldagem, equipamentos para indústria química, peças de fornos, estufas; resiste à oxidação até temperaturas da ordem de 1100°C.
316	0,08	16,0 18,0	10,0 14,0	Mo: 2,0 a 3,0 Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Menor resistência à corrosão química; para equipamentos da indústria química, de papel, etc.
317	0,08	18,0 20,0	11,0 14,0	Mn: 3,0 a 4,0 Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Melhor resistência a corrosão que o tipo 316, idênticas aplicações.
321	0,08	17,0 19,0	9,0 12,0	Ti=5x%C min. Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Tipo 18:8, estabilizado contra corrosão intercrystalina a altas temperaturas; para aplicações que exigem soldagem.
347	0,08	17,0 19,0	9,0 12,0	Nb=10x%C min. Mn: 2,0 max. Si: 1,0 max.	Tipo 18:8, estabilizado para serviço a alta temperatura e onde se exige soldagem.

Já na Tabela 4, têm-se as ligas inoxidáveis ferríticas, indicando onde usualmente são aplicadas, suas propriedades e características.

Tabela 4 - Composição química, % em peso, e aplicações de alguns aços inoxidáveis ferríticos

Tipo AISI	C	Cr	Ni	Outros Elementos	Propriedades Gerais e Aplicações Típicas
403	0,15 max.	11,5 13,0	-	Si: 0,50 max. Mn: 1,00 max.	Tipo turbina: para lâminas forjadas ou usinadas de turbina e compressor.
410	0,15 max.	11,5 13,5	-	Si: 1,00 max. Mn: 1,00 max.	Tipo turbina: aço inox de baixo custo para aplicações gerais, na forma de peças temperadas ou chapas e tiras recozidas.
414	0,15 max.	11,5 13,5	1,25 2,50	Si: 1,00 max. Mn: 1,00 max.	Tipo turbina: para molas, lâminas de facas, etc.
416	0,15 max.	12,0 14,0	-	P, S ou Se: 0,07 min. Mo ou Zr: 0,60 max. Mn: 1,00 max. Si 0,50 max.	Tipo turbina, de usinagem fácil.
431	0,20 max.	15,0 17,0	1,25 2,50	Si: 1,00 max.	Tipo turbina: melhores propriedades mecânicas e resistência à corrosão dentre os tipos martensíticos ou endurecíveis.
420	0,15 min.	12,0 14,0	-	Si: 1,00 max. Mn: 1,00 max.	Tipo cutelaria: instrumentos cirúrgicos, mancais de esfera, válvulas, etc.
440A	0,60 0,75	16,0 18,0	-	Mo: 0,75 max. Si: 1,00 max. Mn: 1,00 max.	Tipo cutelaria e resistência ao desgaste: dureza elevada; para cutelaria, instrumentos cirúrgicos, válvulas, mancais anti-fricção, etc.
440B	0,75 0,95	16,0 18,0	-	Si: 1,00 max. Mo: 0,75 max. Mn: 1,00 max.	Idem 440A.
440C	0,95 1,20	16,0 18,0	-	Mo: 0,75 max. Si: 1,00 max. Mn: 1,00 max.	Idem 440A.

Fonte: Adaptado de Modenesi, (2001, p. 9)

Os aços inoxidáveis duplex e endurecidos por precipitação, não menos importantes, também apresentam boas características e seu uso também é constante. Segundo Modenesi (2001), os aços inoxidáveis duplex são utilizados em trocadores de calor, componentes de equipamentos expostos à água do mar, bombas e tubos nas indústrias petroquímica, química, de papel e celulose. Já os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação são utilizados em situações que exigem elevados níveis de resistência mecânica e boa resistência à corrosão e oxidação.

2.1.2 Aço inoxidável AISI 304

A maioria dos aços classificados como austeníticos possuem teor médio de 18 % de cromo e 8 % de níquel. A presença do níquel produz uma maior resistência à corrosão a elevadas temperaturas, isso porque o níquel é mais nobre que o ferro e tem a capacidade de formar uma camada de óxido protegendo o aço naturalmente (CHIAVERINI, 2008).

Para Modenesi (2001), os aços inoxidáveis austeníticos podem apresentar em sua composição química teores de níquel entre 6 e 26 %, de cromo entre 16 e 30 % e menos de 0,30 % de carbono, devendo totalizar no mínimo 26 % o teor dos elementos de liga. Em temperatura ambiente, apresentam alta resistência e ductilidade. Também possuem boa soldabilidade e resistência à corrosão, o que proporciona diversas utilizações para este grupo de aços inoxidáveis.

Baseado nisto, evidencia-se que o aço inoxidável AISI 304 está enquadrado no grupo dos aços austeníticos, conforme mostra a Tabela 5, indicando sua composição química.

Tabela 5 - Composição química do aço inoxidável AISI 304, % em peso

ASTM AISI	UNS	DIN	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	OUTROS
304	S30400	1.4301	0,07	2	0,75	0,045	0,015	17,5 a 19,5	8,0 a 10,50	-	0,1	-

Fonte: Adaptado de APERAM, (2012, p. 3)

O aço inoxidável AISI 304 possui basicamente em sua composição química, em média, 0,08 % de carbono, de 18 a 20 % de cromo, 8 a 11 % de níquel, e no máximo, 2 % de manganês e 1 % de silício. É muito utilizado em utensílios domésticos, ornamentação, fins estruturais, equipamentos para indústria naval, química, transportes e alimentícia (MODENESI, 2001).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas indica na ABNT NBR 5601 que o nível de carbono máximo aceitável é de 0,08 %. O cromo deve ficar entre 18 a 20 %, o níquel entre 8 a 10,50 %, e também possuir no máximo 2 % de manganês e 1 % de silício.

2.1.2.1 Comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 304

O aço inoxidável AISI 304 é um material de ótima estampabilidade quando comparado com as demais ligas do mesmo grupo austenítico. Sua soldabilidade é muito boa e a resistência a corrosão é classificada como boa. Apresenta um limite de resistência muito bom e seu limite de escoamento está dentro dos padrões para este grupo de materiais (APERAM, 2012). Na Tabela 6, têm-se os valores das propriedades mecânicas do aço AISI 304.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304

ASTM		Limite de	Limite de	Alongamento	Dureza Rockwell - B	Dobramento a frio
AISI	UNS	Resistência (MPa)	Escoamento (MPa)	50mm (%)		
304	S30400	600	280	58	75	180°

Fonte: Adaptado de APERAM (2012, p. 3)

Para Chiaverini (2008), nos aços inoxidáveis austeníticos a condição do material interfere em suas propriedades mecânicas, pois se estiver no estado recozido ou encruado as características mudam. Como os aços austeníticos não são endurecíveis por têmpera, utiliza-se o método de encruamento para aumentar a dureza e a resistência mecânica. No entanto, essas propriedades sujeitam-se ao produto acabado ou semi-acabado, e claro, a composição química.

2.2 Conformação mecânica

Para Helman e Cetlin (2005), uma operação onde se aplicam solicitações mecânicas em metais e que resultam em uma mudança permanente de dimensões, define-se como conformação mecânica.

Além da mudança de dimensões, outro resultado obtido comumente através da conformação mecânica é a alteração das propriedades do metal em relação às aquelas anteriores ao processamento. (HELMAN; CETLIN, 2005, p. 15).

Para Schaeffer (2004), caracterizam-se como alguns dos principais métodos de conformação mecânica: trefilação, extrusão, forjamento, estampagem e laminação. Fatores como velocidade de deformação, condições de escoamento e relações de tensões X deformações podem apresentar condições determinantes no processo de conformação mecânica.

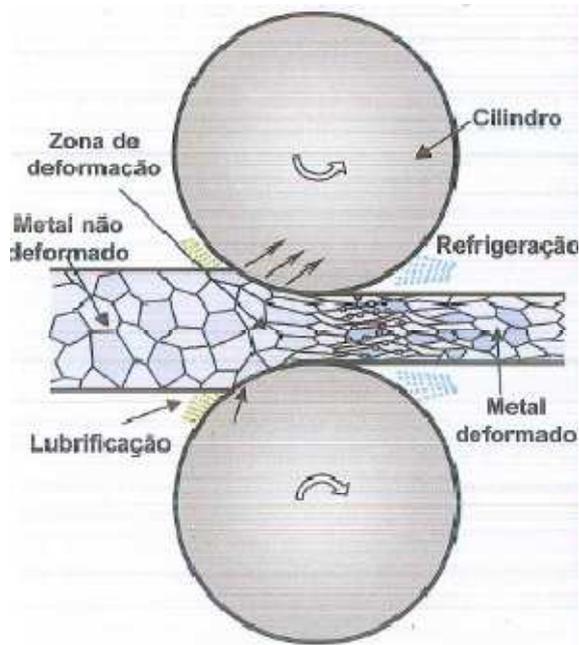
2.2.1 Laminação

Segundo Rizzo (2007), o processo de laminação é efetuado por duas razões básicas. Primeiramente, para se obter formas que seriam difíceis ou inviáveis de serem produzidas por outro método e principalmente por ser um método mais econômico que os demais. O processo de laminação é um processo de conformação mecânica amplamente aplicada às ligas metálicas, sendo que mais de 90 % dos aços passam ao menos uma vez por processos de laminação. A segunda razão consiste no fato de as propriedades mecânicas dos metais serem geralmente melhoradas pela conformação mecânica, sendo o encruamento o efeito mais relevante deste processo, frequentemente utilizado para aumentar a resistência mecânica dos materiais.

A laminação consiste na passagem de uma peça entre dois cilindros que giram, de forma a reduzir a área de uma seção transversal. No caso de placas e chapas, o processo é bastante semelhante ao estiramento por forjamento, apresenta bom controle dimensional e produtividade muito maior devido à sua continuidade. (HELMAN; CETLIN, 2005, p. 193).

Schaeffer (2004) também cita que a laminação é um processo de conformação mecânica que tem como objetivo principal a redução de seção de blocos ou barras, o aumento dos comprimentos e a melhoria das propriedades dos materiais (ductilidade, resistência mecânica e estrutura superficial). Na Figura 2, tem-se a representação do processo de laminação, que segundo Rizzo (2007), quando o material passa pelos cilindros, a tensão aplicada entre o produto em processamento e os cilindros, gera uma deformação plástica deformando os grãos, reduzindo a espessura e aumentando o comprimento do material. O processo de laminação é uma das origens da anisotropia, pois neste processo ocorre a conformação do material e a possível reorganização dos grãos da estrutura do material.

Figura 2 - Representação esquemática do processo de laminação



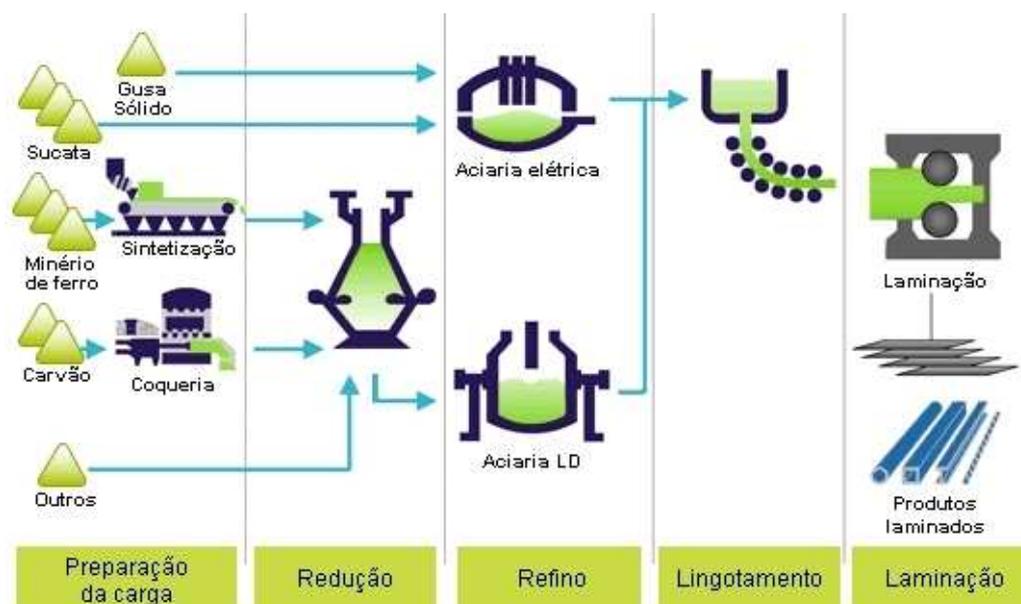
Fonte: Rizzo, (2007, p. 10)

2.2.1.1 Processo de fabricação da chapa de aço inoxidável AISI 304

O processo de fabricação de chapas de aço é, basicamente, o roteiro apresentado na Figura 3. Inicia-se pela etapa de preparação da carga, onde grande parte do minério de ferro é aglomerada utilizando-se cal e finos de coque. Na coqueria o carvão é processado e transforma-se em coque. A segunda etapa chama-se redução, onde as matérias-primas da primeira etapa são carregadas no alto forno e aquecidas com a queima de oxigênio com o carvão a uma temperatura de aproximadamente mil graus. Esse calor funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro em ferro-gusa, que é uma liga de ferro com um teor elevado de carbono.

Na terceira etapa tem-se o refino, onde é feito o ajuste da composição química, a remoção de carbono excessivo e impurezas contidas na gusa já em forma líquida. E na penúltima etapa é feito o lingotamento, onde parte do aço líquido é solidificada em forma de lingotes, blocos e produtos semi-acabados. A última etapa é a de laminação, onde os produtos originados no processo de lingotamento são utilizados a produção do produto final em forma de chapas, barras, vigas e tubos.

Figura 3 - Fluxograma do processo de fabricação dos aços



Fonte: Adaptado de <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp>

2.3 Anisotropia dos materiais metálicos

Para Llewellyn e Hudd (1994), as propriedades mecânicas e físicas dos cristais estão diretamente ligadas a direção cristalográfica na qual são medidas e essa dependência das propriedades com a direção é chamada de anisotropia. Geralmente os metais policristalinos possuem uma orientação preferencial, tendendo a serem anisotrópicos (DEITER, 1981). E o grau dessa anisotropia varia conforme o alinhamento dos cristais e também devido à deformação mecânica ocasionada no processo de laminação.

Para Chiaverini (2008), a anisotropia em alguns metais e ligas metálicas pode influenciar nas propriedades magnéticas do material. O encruamento gerado durante o processo de laminação, quando recristalizados por recozimento, geram novos grãos com seus eixos cristalográficos em direções preferenciais. Sendo assim, a anisotropia e a direção dos cristais podem promover ao material melhores propriedades magnéticas em algumas direções.

Esse efeito de direcionalidade das propriedades é conhecido como anisotropia e está associado à variação do espaçamento atômico ou iônico em função da direção cristalográfica (CALLISTER, 2014, p. 53).

É importante conhecer o comportamento das inclusões não-metálicas, pois influenciam em diversas propriedades do aço. Inclusões com plasticidade elevada alongam-se

no sentido da deformação durante o processo de conformação, e de outro modo, podem ocorrer quebras nas inclusões quando elas não se deformam, ficando distribuídas por toda extensão do material (SILVA, 2006).

Segundo Dieter (1981), existem dois tipos básicos de anisotropia em metais:

- Fibramento mecânico

Este tipo de anisotropia pode ocorrer em chapas grossas ou em peças forjadas. Ocorre em função do alinhamento preferencial de descontinuidades estruturais causadas por vazios, inclusões e segregações na direção da deformação plástica do material.

- Anisotropia cristalográfica

Ocasionado pela deformação plástica do material, resultando na orientação preferencial dos grãos. Em função disso, as propriedades mais afetadas são a resistência mecânica e o limite de escoamento. A anisotropia ocorre com maior frequência em metais não ferrosos, durante o processo de laminação para a produção de chapas finas. Durante o processo de estampagem profunda é possível que anisotropia cristalográfica se manifeste com a formação de “orelhas” ou deformação não uniforme do material.

É possível avaliar a anisotropia utilizando-se o índice de anisotropia, conforme equação 01, que é definido como a razão das deformações verdadeiras oriundas da deformação do ensaio ou pela relação entre a deformação real da largura pela deformação real do comprimento do CP, antes e após o ensaio de tração. As equações 02 e 03 referem-se à anisotropia média e anisotropia planar, respectivamente (DEITER, 1981).

(01)

$$r = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{b_0 * l_0}{b_1 * l_1}}$$

Onde:

r = índice de anisotropia

b₁ = largura do CP após o ensaio

b₀ = largura inicial do CP

l₁ = comprimento útil do CP após o ensaio

l_0 = comprimento útil inicial do CP

(02)

$$r_m = \frac{(r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ})}{4}$$

(03)

$$\Delta r = \left[\frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \right] - r_{45^\circ}$$

Onde:

r_m = anisotropia média

Δr = anisotropia planar

r_{0° = índice de anisotropia à 0°

r_{45° = índice de anisotropia à 45°

r_{90° = índice de anisotropia à 90°

Para Schaeffer (2004), normalmente os índices de anisotropia são utilizados para avaliar a conformabilidade de um material. E para a determinação dos valores de “r”, o ensaio de tração é o mais indicado, pois dá uma idéia exata do grau de conformação que uma chapa fina pode suportar na deformação a frio. Podem ocorrer três situações distintas com relação a anisotropia:

- Ocorre isotropia total quando: $r_{0^\circ} = r_{45^\circ} = r_{90^\circ} = 1$
- Ocorre anisotropia normal ou média e anisotropia planar: $r_{0^\circ} = r_{45^\circ} = r_{90^\circ} \neq 1$
- Ocorre anisotropia média ou normal + anisotropia planar: $r_{0^\circ} \neq r_{45^\circ} \neq r_{90^\circ} \neq 1$

2.4 Análise metalográfica

Trata-se de um método vastamente utilizado para a caracterização da microestrutura dos materiais, de fácil execução e de boa compreensão dos dados e valores encontrados. Normalmente utilizado para a determinação do tamanho de grão, e possíveis defeitos e inclusões em sua microestrutura.

Existem diferentes técnicas para se analisar a estrutura dos aços e ferros fundidos de forma microscópica, sendo que a mais comum é a microscopia ótica. As formas de preparação de corpos de prova são semelhantes para um grande grupo de técnicas em que se analisa a microestrutura através de seções. Para análise de falhas, é possível a visualização de superfícies sem preparação alguma, com o uso de microscopia eletrônica de varredura. Já na microscopia eletrônica de transmissão, a preparação das amostras é bastante diferente das demais técnicas, exigindo uma preparação específica (COLPAERT, 2008).

O exame microscópico é uma ferramenta extremamente útil no estudo e na caracterização dos materiais. Dentre as várias aplicações importantes para exames microestruturais, podem ser destacadas as seguintes: assegurar que as associações entre as propriedades e a estrutura (e os defeitos) sejam compreendidas de forma apropriada, a fim de prever as propriedades dos materiais uma vez que essas relações tenham sido estabelecidas; projetar ligas com novas combinações de propriedades; determinar se um material foi ou não tratado termicamente da maneira correta; verificar o modo de uma fratura mecânica (CALLISTER, 2014, p. 105).

Para Callister (2014), o ensaio metalográfico nada mais é que uma microscopia ótica, onde um microscópio óptico é utilizado para analisar a microestrutura dos materiais e seus elementos básicos são a iluminação e sistemas ópticos. Cuidados e procedimentos devem ser adotados para obterem-se os detalhes mais importantes da microestrutura durante o exame metalográfico. Em materiais metálicos, somente é possível a observação da superfície do material no modo de reflexão, onde a imagem gerada é resultante do contraste produzido pela diferença na refletividade das diferentes regiões da microestrutura.

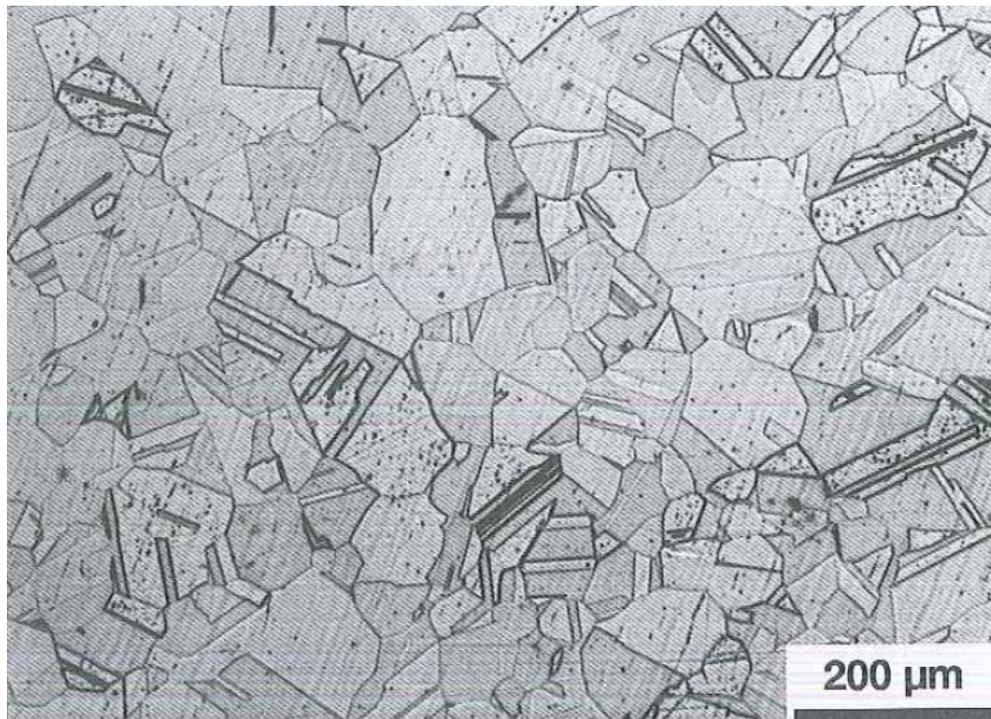
As Figuras 4 e 5 apresentam exemplos de microestruturas de aços inoxidáveis austeníticos. Porém, observa-se que o contorno e o tamanho dos grãos se alteram de uma imagem para a outra. A Figura 4 apresenta grãos um pouco menores com relação a Figura 5, e o contorno de grão está mais definido na Figura 5, pois trata-se de um aço austenítico forjado e solubilizado. Já na Figura 4, tem-se um aço austenítico apenas solubilizado à 1050 °C e resfriado em água. Segundo Colpaert (2008), o tratamento térmico usual nos materiais forjados e laminados é o tratamento de solubilização, para dissolver carbonetos nocivos à resistência à corrosão.

Figura 4 - Aço inoxidável austenítico AISI 304 solubilizado a 1050 °C, resfriado em água



Fonte: Colpaert (2008, p. 529)

Figura 5 - Aço austenítico AISI 304 forjado e solubilizado



Fonte: Colpaert (2008, p. 530)

Colpaert (2008) também enfatiza que cuidados e uma sequência de trabalho devem ser adotados para se obter um bom resultado no exame de microscopia ótica. A escolha e a localização da seção do material a ser estudado é a primeira etapa, seguido da obtenção de uma superfície plana e polida da amostra em estudo. Uma verificação prévia no microscópio a fim de evidenciar ocorrências sem o ataque químico é aconselhável. Após as etapas anteriores, é feito o ataque químico com o reagente adequado, o exame ao microscópio para observação da microestrutura e por fim a verificação e registro do aspecto observado.

No caso de peças em que anisotropia pode ser esperada (forjados, laminados, peças estampadas, etc.) a orientação da seção escolhida para a realização do exame micrográfico é muito importante e deve ser registrada. Convém, ao cortar as amostras para a preparação micrográfica, identificá-las claramente, indicando, inclusive, a orientação longitudinal da peça original (COLPAERT, 2008, p. 70).

Colpaert (2008) enfatiza muito que não seguir uma sequência de trabalho ou esquecer alguma das etapas, pode comprometer o resultado final do ensaio. Realizar a escolha e a localização da seção a ser estudada de forma correta, obter uma superfície plana e polida no local escolhido para estudo e realizar o ataque químico da superfície com o reagente ideal são etapas fundamentais na execução do exame metalográfico. Indica-se a utilização de uma lista com as etapas a serem trabalhadas e conforme elas são concluídas, deve-se fazer o registro, confirmando a execução da tarefa.

2.5 Propriedades mecânicas e magnéticas

2.5.1 Ensaio de tração

A resistência de um material está diretamente ligada a sua capacidade de resistir a uma carga sem ruptura ou deformação excessiva. Essa característica é inerente ao próprio material e pode ser determinada por métodos experimentais, por exemplo, pelo ensaio de tração. Este é um dos testes mais importantes, pois com ele é possível determinar diversas propriedades mecânicas do material, e uma das mais importantes é a relação entre a deformação normal média e a tensão normal média (HIBBELER, 2010).

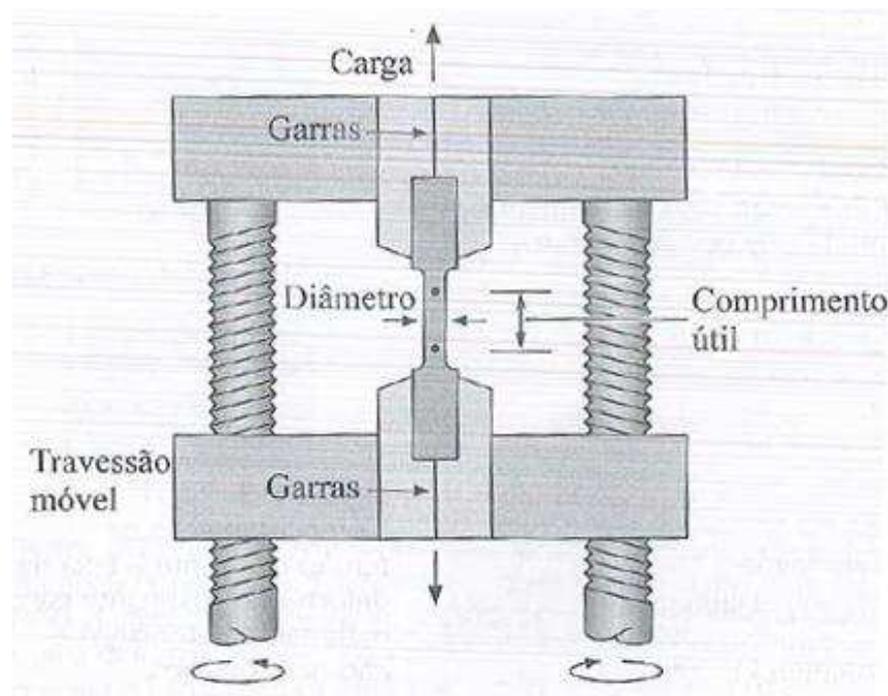
Um dos caminhos mais importantes para a determinação das propriedades mecânicas dos materiais é o ensaio de tração. Sua fácil execução e a possibilidade de reprodução dos resultados colocam o ensaio de tração como um dos principais da engenharia (BLUHM; MORRISEY, 1965). Nas engenharias o ensaio de tração é vastamente aplicado para a

determinação das características mecânicas dos materiais. É possível determinar o limite de resistência a tração, coeficiente de resistência, limite de escoamento, coeficiente de encruamento, módulo de elasticidade, ductibilidade, módulo de tenacidade e módulo de resiliência (GARCIA et al., 2000).

Do mesmo modo, para Askeland (2013), o ensaio de tração pode fornecer dados do limite de escoamento, do módulo de elasticidade (Young), do limite de resistência e da ductibilidade dos materiais. De modo geral, é um teste utilizado para metais, ligas metálicas e polímeros, não sendo indicado para os materiais cerâmicos visto que as amostras são muito frágeis e podem romper já em sua fixação na máquina.

Portanto, a fim de exemplificar, a Figura 6 corresponde a ilustração do teste de tração em metais e ligas metálicas. Uma carga uniaxial é aplicada para tracionar o corpo de prova que está fixado nas garras da máquina. O comprimento útil ou área útil do corpo de prova é a região que irá sofrer grande parte dos impactos gerados pela carga aplicada. O corpo de prova pode ser com formato cilíndrico (barras) ou retangular (chapas).

Figura 6 - Esquema da máquina para ensaio de tração



Fonte: Askeland, (2013, p. 150)

Conforme Askeland (2013), a tensão de engenharia e a deformação de engenharia, define-se pelas equações 04 e 05 a seguir:

(04)

$$\text{Tensão de engenharia} = \sigma = \frac{F}{A_0}$$

Onde:

σ = tensão de engenharia

F = carga aplicada

A_0 = área da seção transversal inicial

(05)

$$\text{Deformação de engenharia} = \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Onde:

ε = deformação de engenharia

Δl = variação do comprimento sob a força

l_0 = comprimento útil inicial do CP

O ensaio resume-se no uso de uma carga de tração uniaxial em um corpo de prova, normalmente padronizado, onde as deformações são distribuídas de modo uniforme ao longo do corpo de prova até sua ruptura. A deformação gradativa ao longo do CP possibilita a obtenção de medições muito precisas na deformação decorrente da força aplicada. E para o Engenheiro, a medição dessa variação é muito importante, pois é a partir dela que se elabora a curva de tensão-deformação do material. Mas, ao atingir o ponto de tensão máxima que o material suporta, a deformação uniforme cessa devido ao surgimento de estricção, ou redução da seção do corpo de prova, em metais com boa ductibilidade. Normalmente a ruptura do material ocorre na faixa estrita, ou em casos de rara ocorrência, ocorre em outra região devido a defeitos internos (SOUZA, 1982).

Quando as tensões são criadas por uma carga axial, tensões normais e de cisalhamento são geradas. Imaginando-se um corte oblíquo de uma seção do material sob essas tensões,

tem-se que a tensão normal é máxima quando o ângulo de corte da seção for 0° . Já a tensão de cisalhamento será máxima quando o ângulo de corte da seção for de 45° (BEER et al., 2015).

Em diversos metais ocorre uma transição gradual do comportamento elástico para o comportamento plástico, e existe dificuldade em definir com precisão o ponto inicial da deformação plástica neste tipo de material. Diferentes regras são usadas para determinar o início do escoamento, que dependem da sensibilidade das medições de deformação e da intenção da utilização dos dados.

Ao se aplicar uma tensão baixa a um material, ele irá deformar-se elasticamente. Essa deformação desaparece por completo ao se remover a tensão aplicada. No entanto, se a tensão aplicada aumentar, o material cederá à tensão aplicada e apresentará tanto deformação elástica como plástica. O valor crítico de tensão necessário para iniciar a deformação plástica é definido como limite elástico do material. Define-se limite proporcional a tensão acima da qual a relação entre tensão e deformação deixa de ser linear (ASKELAND, 2013, p. 154).

Para Silva (2006), em determinado nível de tensão aplicada, inicia a deformação plástica e a soma das deformações plástica e elástica é a deformação total medida. Assim, a proporcionalidade entre a tensão e a deformação total deixa de existir, mesmo que a parte elástica da deformação ainda seja proporcional à tensão. A região onde começa a ocorrer a deformação plástica é denominada de limite de escoamento, onde a deformação plástica pode iniciar por meio de uma transição suave ou não. Se a transição não for suave, chama-se de escoamento nítido, ficando mais fácil sua determinação em função da descontinuidade na curva de tensão x deformação.

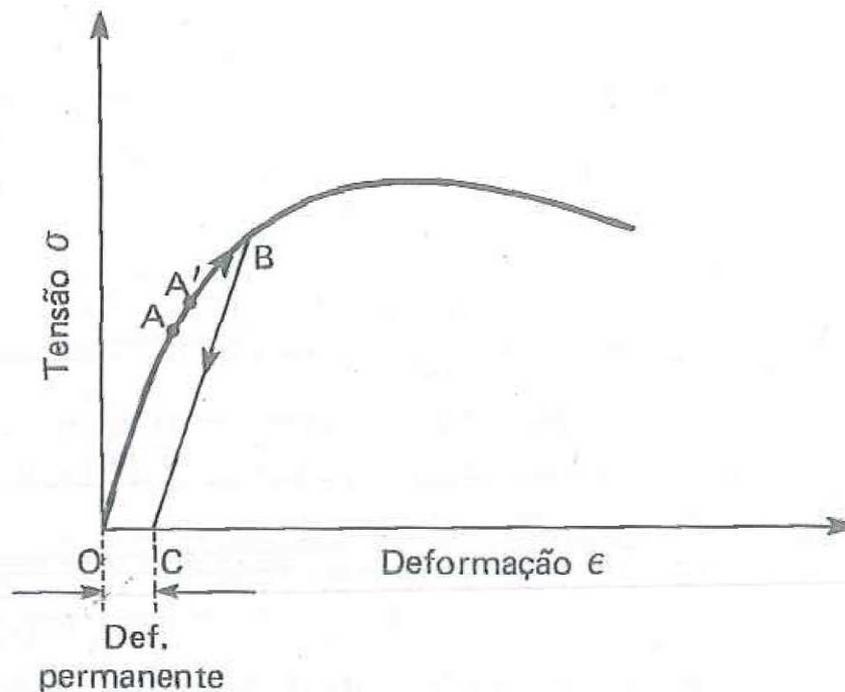
Quando não ocorre escoamento nítido, a definição do ponto exato em que se inicia a deformação plástica é difícil. Neste caso, convencionam-se uma determinada deformação plástica para definir o limite de escoamento. Os limites de escoamento convencionais mais comumente adotados são 0,2 % de deformação plástica ou 0,5 % de deformação total (SILVA, 2006, p. 600).

A curva de tensão-deformação possui uma região linear, e a inclinação desta região é definida como módulo de elasticidade ou módulo de Young. O módulo de elasticidade é uma medida de rigidez do material. A deformação elástica, decorrente da aplicação de uma carga, será menor quanto maior for o módulo de elasticidade. Essa é uma variável importante, pois é necessária para a resolução dos cálculos da deflexão de vigas e demais componentes (MEYERS; CHAWLA, 1982).

Suportar tensões pontuais acima da tensão de escoamento sem fraturar é uma situação desejável em diversos componentes. A capacidade de um material em absorver energia na região plástica é definida como tenacidade. No regime plástico, os materiais são expostos a tensões onde as deformações são definitivas. Diferentes materiais podem possuir comportamentos similares durante o ensaio de tração. A curva resultante do ensaio de tração é a curva tensão x deformação de engenharia, conforme Figura 7, onde observa-se o comportamento até sua fratura, de um material metálico (GODEFROID; CANDIDO, 2010).

Na Figura 7, a deformação permanente refere-se a uma deformação onde não é mais possível retornar ao estado original. As letras A e A' indicam um patamar de escoamento não definido, apenas indicam a região em que ocorre a transição do regime de deformação elástica para o regime de deformação plástica.

Figura 7 - Gráfico da curva tensão vs deformação de engenharia



Fonte: Souza, (1982, p. 9)

O limite de resistência é a tensão correspondente à máxima força aplicada. A deformação em materiais dúcteis não se mantém uniforme, pois em algum ponto do corpo de prova, uma região irá deformar mais que outras reduzindo sua seção transversal. Conforme a Figura 8, essa deformação localizada é chamada de estrição ou empescoamento, e só é

possível sua observação em ensaios de tração, pois em ensaios de compressão os corpos de prova deformam na direção transversal ao eixo de compressão (ASKELAND, 2013).

Figura 8 - Representação da estrição ou empescoamento



Fonte: Askeland (2013, p. 155)

Fatores como temperatura, anisotropia do material, porcentagem de impurezas presentes no material, velocidade de deformação e tamanho de grão, podem interferir nos dados obtidos de um ensaio de tração (GARCIA et al., 2000). Para Silva (2006), a velocidade de aplicação do carregamento tem impacto direto sobre a tensão de escoamento. Portanto, é de extrema importância observar os parâmetros estipulados nas normas de ensaio a fim de obter resultados confiáveis.

2.5.1.1 Corpos de prova para ensaio de tração

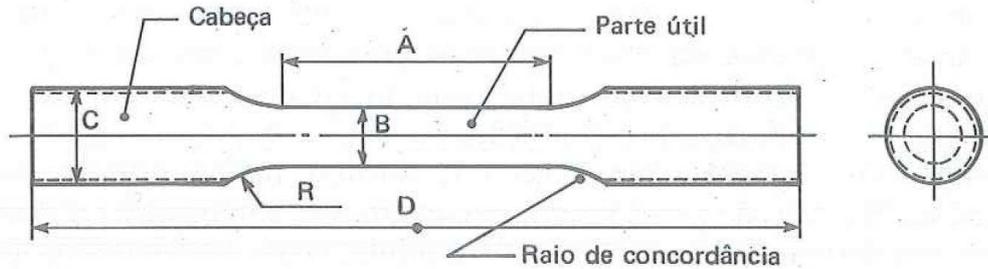
Existem diferentes tipos de corpo de prova, em suas diferentes formas e tamanhos. Normalmente sua matéria prima original é quem irá definir o formato a ser utilizado, e as diversas normas que existem irão reger a criação destes CP.

Em ensaios de tração, a melhor forma para a determinação das propriedades mecânicas de um metal é ensaiar um corpo de prova retirado da peça. Normalmente são corpos de prova normalizados, por normas internacionais como a ISO, ou por normas nacionais como ABNT e NBR (SOUZA, 1982). Nas Figuras 9 e 10 têm-se as formas indicadas para os corpos de prova, conforme o método MB-4 da ABNT.

A letra A representa o comprimento da área útil do corpo de prova. A letra B indica a largura da seção da área útil. Já a letra C refere-se à largura da região que é utilizada para fixação do corpo de prova na máquina de ensaio. A letra D indica o comprimento total do

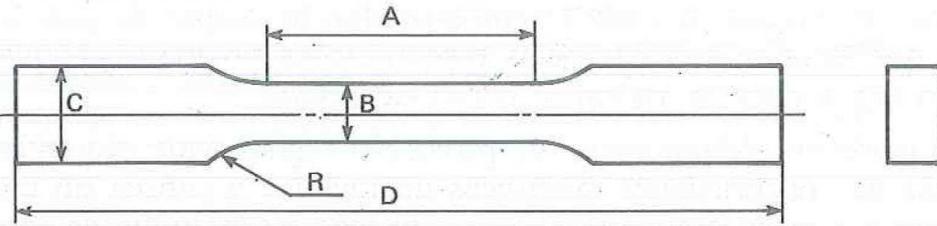
corpo de prova e a letra R refere-se ao raio de transição da seção de fixação para a seção de área útil do corpo de prova.

Figura 9 - Corpo de prova para ensaio de tração com seção circular



Fonte: Souza (1982, p. 13)

Figura 10 - Corpo de prova para ensaio de tração com seção retangular



Fonte: Souza (1982, p. 13)

As dimensões para cada CP estão indicadas na Tabela 7, e podem variar conforme o material, e no caso de chapas, conforme a espessura.

Tabela 7 - Dimensões dos corpos de prova

Corpo de prova	A (mm)	B (mm)	C (mm) (aprox.)	D (mm) (aprox.)	R (mm) (mín.)
Redondo – ABNT	70	10	18	150	15
Redondo – ASTM	60	12,5	18	130	15
Chapa fina – ABNT	75	12,5	20	200	20
Chapa grossa – ABNT	240	40	50	400	25
Chapa fina – ASTM	60	12,5	20	200	12,5
Chapa grossa – ASTM	225	40	50	450	25
Ferro fundido – ABNT – tipo A	30	20	30	100	25
Ferro fundido – ABNT – tipo B	105	20	30	180	25
Ferro fundido – ASTM – tipo A	32	12,5	22	95	25
Ferro fundido – ASTM – tipo B	38	19	32	100	25
Ferro fundido – ASTM – tipo C	57	31,5	47	160	50

Fonte: Souza (1982, p. 15)

Segundo Schaeffer (2004), na atualidade toda chapa é produzida pelo processo de laminação. Existem diferentes classificações, onde são consideradas propriedades como espessura, temperatura de laminação, material, acabamento de superfície dentre outras características. A Tabela 8 indica a classificação de chapas através da espessura.

Tabela 8 - Classificação de chapas por espessura

Espessura	Denominação
$e < 3 \text{ mm}$	Chapa fina
$3 \text{ mm} \leq e < 4,76 \text{ mm}$	Chapa média
$4,76 \text{ mm} \leq e$	Chapa grossa

Fonte: Adaptado de Schaeffer (2004, p.122)

Os corpos de prova podem ter sua parte útil com seção retangular ou circular. Isso depende do formato e do tamanho do produto do qual o corpo de prova foi extraído. Normalmente quando são extraídos de chapas, lâminas ou placas a seção é retangular e quando extraídos de barras ou são fundidos, a seção é circular. E caso a peça de onde o CP será extraído for muito pequena, os métodos de ensaio fornecem alternativas de CP's com tamanhos reduzidos (SOUZA, 1982).

A parte útil de um corpo de prova é a região onde são feitas as medidas das propriedades mecânicas do metal e a cabeça do corpo de prova é a parte destinada apenas à fixação na máquina de ensaio, podendo ou não ser rosqueada, conforme o tipo das garras da máquina (SOUZA, 1982, p. 14)

Souza (1982) ainda cita que a utilização de CP's padronizados é importante por diversos motivos, dentre eles:

- Facilidade de adaptação na máquina e de execução do ensaio
- Permite sempre a ruptura do material
- Permite o fácil cálculo das propriedades mecânicas
- Permite a comparação dos alongamentos e estirções
- Ausência de irregularidades que poderiam afetar os resultados

Para Schaeffer (2004), diferentes comprimentos, larguras e formatos de corpo de prova são utilizados em testes com chapas metálicas. Chapas com espessuras entre 0,1 mm e 3,0 mm normalmente são extraídos CP's em formato de tiras, com 20 mm de largura e 250

mm de comprimento. São fixados na máquina do ensaio de tração de modo que fiquem com no mínimo 140 mm de região livre. São CP's facilmente produzidos com o uso de guilhotina e retificados para eliminar possíveis trincas, quando necessário.

2.5.2 Fratura dúctil

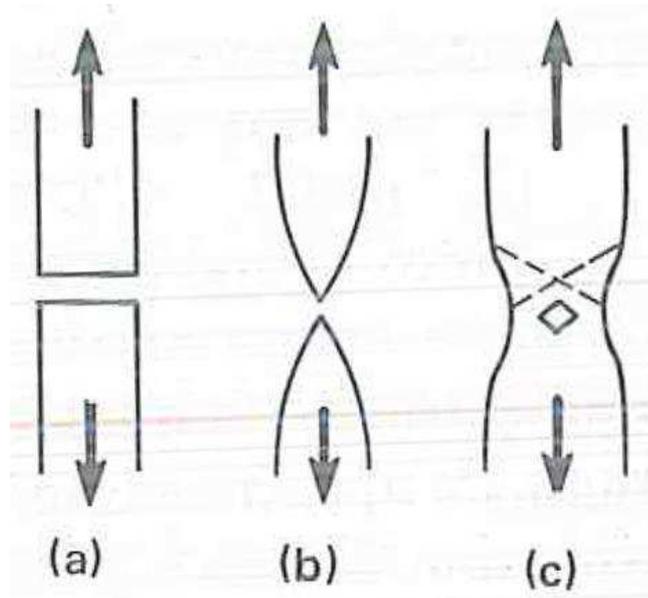
Falhas em materiais não é um acontecimento desejável, pois podem causar desastres e problemas no processo produtivo industrial. Por este motivo, os engenheiros buscam a cada dia analisar da melhor forma possível os diversos tipos de materiais que surgem ao redor do mundo.

O processo de fratura envolve duas etapas, a formação e propagação de trincas, que é a resposta quando o material é submetido à tensão. Uma prolongada deformação plástica ocorrendo próximo a uma trinca que avança pela região do material define uma fratura dúctil. E conforme a trinca avança, o processo continua ocorrendo lentamente (CALLISTER, 2014).

A fratura dúctil é quase sempre preferível por duas razões. Em primeiro lugar, a fratura frágil ocorre repentina e catastróficamente, sem qualquer aviso prévio; isso é uma consequência da propagação espontânea e rápida da trinca. Por outro lado, no caso das fraturas dúcteis, a presença de deformação plástica dá um alerta de que uma fratura é iminente, permitindo que medidas preventivas sejam tomadas. Em segundo lugar, mais energia de deformação é exigida para induzir uma fratura dúctil, uma vez que materiais dúcteis são em geral mais tenazes. Sob a ação de uma tensão de tração que está sendo aplicada, a maioria das ligas metálicas é dúctil, enquanto os materiais cerâmicos são notadamente frágeis, já os polímeros podem exibir ambos os tipos de fratura (CALLISTER, 2014, p. 213-214).

Callister (2014) ainda cita que na fratura dúctil, as superfícies irão possuir suas próprias propriedades distintas, tanto em nível microscópico como em nível macroscópico. Na Figura 11, tem-se as representações esquemáticas para fraturas em ensaios de tração. Na representação “a”, ocorre uma fratura frágil, sem qualquer deformação plástica que possa evidenciar uma provável falha no material. Em “b”, este tipo de fratura ocorre normalmente com metais moles, como o ouro puro. Já na representação “c”, que é o tipo mais comum de fratura, tem-se uma leve formação de empescoamento antes da fratura, o que já indica que o material está próximo do momento de fraturar.

Figura 11 - Representação esquemática de fraturas



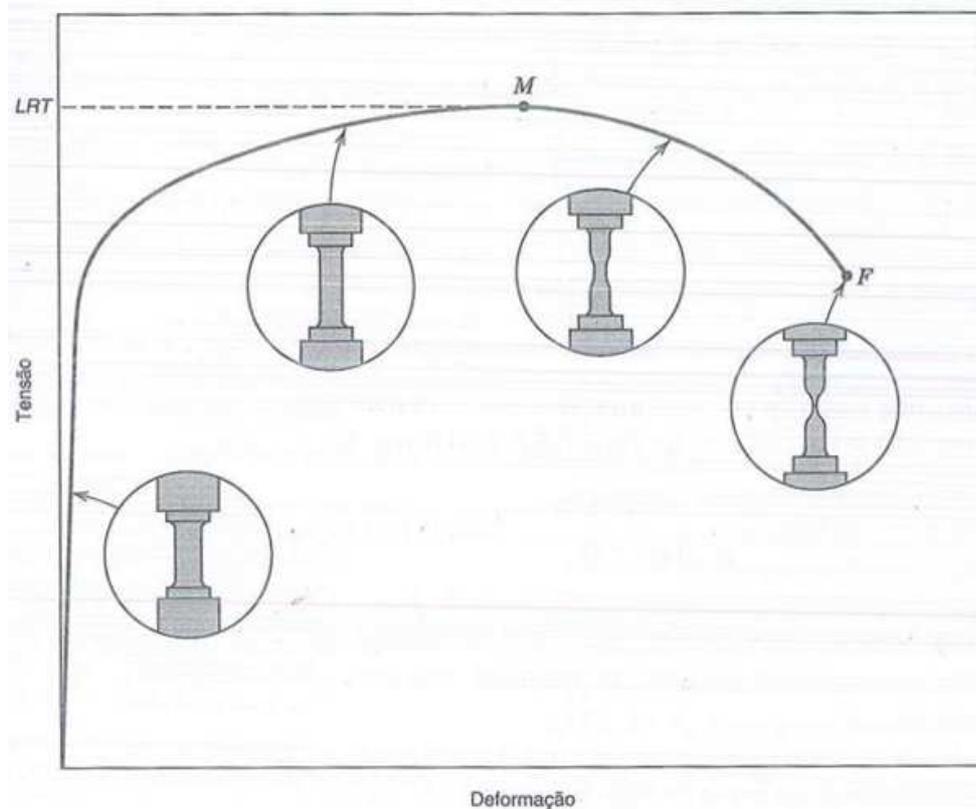
Fonte: Souza (1982, p. 69)

Onde:

- (a) = fratura frágil
- (b) = fratura muito dúctil
- (c) = fratura dúctil

Na Figura 12, tem-se o comportamento típico de fratura dúctil em um corpo de prova durante o processo de ensaio de tração. A região central do CP começa a formar a área de estrição até sua ruptura. O ponto M que direciona para o eixo da tensão, indicando a expressão LRT, refere-se ao limite de resistência a tração, ou seja, é o ponto onde o corpo de prova terá o valor máximo para resistência à tração. O ponto F indica o momento em que o corpo de prova fratura. E é entre o ponto M e o ponto F que ocorre a o acentuamento da estrição do corpo de prova.

Figura 12 - Comportamento do corpo de prova em ensaio de tração



Fonte: Callister (2014, p. 143)

2.5.3 Magnetismo dos aços

Os métodos magnéticos baseiam-se na diferença de comportamento frente a um campo magnético apresentado pela ferrita (material ferromagnético) e a austenita (material paramagnético) (MODENESI, 2001). Para Cullity (1972), o fundamento básico da teoria magnética de materiais é o dipolo magnético, análogo ao dipolo elétrico. A força gerada pelo dipolo magnético respeita a uma lei de interação semelhante às de Newton para atração gravitacional e à de Coulomb para a interação elétrica.

O magnetismo em materiais é oriundo da interação entre o campo externo e o dipolo magnético produzido pelo movimento dos elétrons em torno núcleo atômico e pela relação destes com a rede cristalina do material. O diamagnetismo é um tipo de fraca interação que só perdura enquanto o campo externo está sendo aplicado. O paramagnetismo, ao contrário, envolve dipolo permanente nos elétrons, mas estes não se alinham preferencialmente o que faz com que nenhuma magnetização seja detectada. Já no antiferromagnetismo, os dipolos dos

átomos ou íons são permanentemente opostos de modo que se cancelam reciprocamente (CULLITY, 1972).

Kwun & Burkhardt (1987), afirmam que as propriedades magnéticas de um material são dependentes do tipo e da composição química de cada material e das propriedades metalúrgicas como fases, dureza, tamanho do grão, textura e forças mecânicas. Deste modo, o efeito individual de cada característica do material sobre a microestrutura e propriedades magnéticas são objetos de várias pesquisas de grande potencial para a caracterização não destrutiva dos materiais e monitoramento destas propriedades.

O processo de magnetização pode ser influenciado pela anisotropia. O primeiro fator de anisotropia é a anisotropia cristalina. O fator de anisotropia de forma está relacionado ao fato de que a forma mais adequada para a magnetização é o elipsóide oblongo. Dependendo do nível de tensão, é possível facilitar ou dificultar a magnetização de cristais o que se chama anisotropia de tensão (CULLITY, 1972).

Oka et al. (2009), estudaram o comportamento de um aço inoxidável austenítico AISI 304, e verificaram que as propriedades magnéticas sofrem uma significativa alteração devido a transformação de fases austenítica em martensita provocadas pela fadiga. Esses pesquisadores verificaram que existe uma correlação entre os danos causados pela fadiga do material com a magnetização remanente do material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentam-se os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo, sendo detalhados aspectos como: materiais, corpos de prova, equipamentos e métodos.

A avaliação da qualidade de um produto metalúrgico pode ser estrutural e dimensional (ROHDE, 2010). Para caracterizar as amostras, objeto deste estudo, foram realizados quatro ensaios no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Univates: a análise metalográfica, conforme procedimento laboratorial e norma ASTM E3, o ensaio de tração baseado na norma ASTM E8 / E8M, medições de variação do campo magnético com o auxílio de um Gaussímetro e o ensaio de micro dureza, conforme procedimento laboratorial. O período de desenvolvimento das análises foi de junho de 2016 a outubro de 2016. No fluxograma apresentado na Figura 13, têm-se as etapas básicas deste capítulo.

Figura 13 - Fluxograma das etapas básicas para métodos e materiais



3.1 Corpos de prova

O ponto de partida para a obtenção de um bom resultado é a escolha e preparação adequada da amostra. Todos os corpos de prova foram extraídos de uma mesma chapa de aço inoxidável AISI 304 com 2 milímetros de espessura, em uma indústria metal mecânica, situada em Estrela – RS, no Vale do Taquari.

Para a análise metalográfica foram extraídos dois corpos de prova. Já para o ensaio de tração, quinze corpos de prova, sendo cinco extraídos no mesmo sentido da laminação da chapa, outros cinco à 45° do sentido de laminação e mais cinco perpendiculares ao sentido de laminação.

As medições de variação do campo magnético foram executadas em quinze corpos de prova, também extraídos seguindo o mesmo critério do ensaio de tração, porém, passando pelo processo de deformação à frio com diferentes ângulos de dobra. Os corpos de prova para o ensaio de dureza foram confeccionados a partir dos CP's que apresentaram as maiores variações nas medições de campo magnético, especificamente, na região deformada.

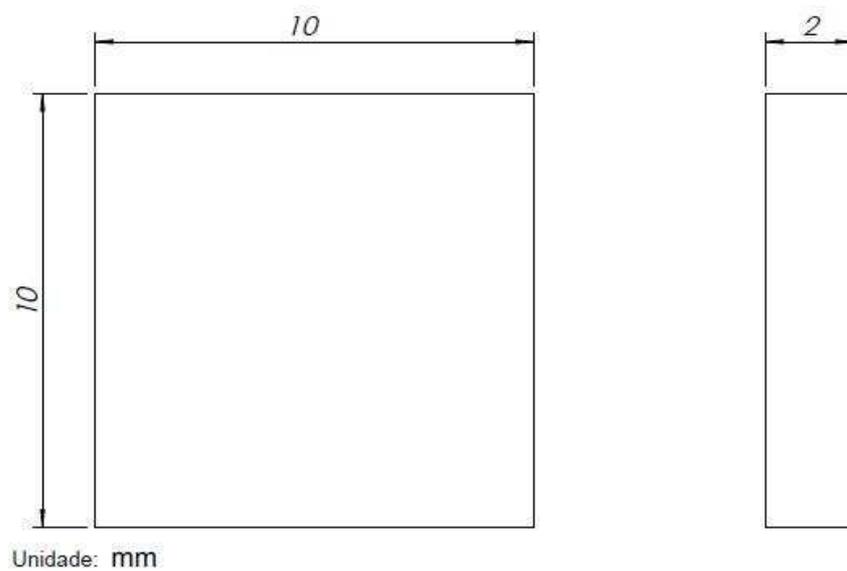
3.1.1 Corpos de prova para análise metalográfica

Seguindo a norma ASTM E3, com o uso de uma máquina de corte guilhotina marca Sorg, modelo SGH 68/30 (Figura 14), foram cortadas as amostras, sendo que sua área não poderia exceder de 1 a 2 cm², sob pena de se ter um tempo de preparação excessivo. Ambos os corpos de prova possuem 2 milímetros de espessura, 10 milímetros de largura e 10 milímetros de comprimento, conforme Figura 15.

Figura 14 - Máquina de corte guilhotina Sorg



Figura 15 - Medidas do corpo de prova para análise metalográfica



3.1.2 Corpos de prova para ensaio de tração

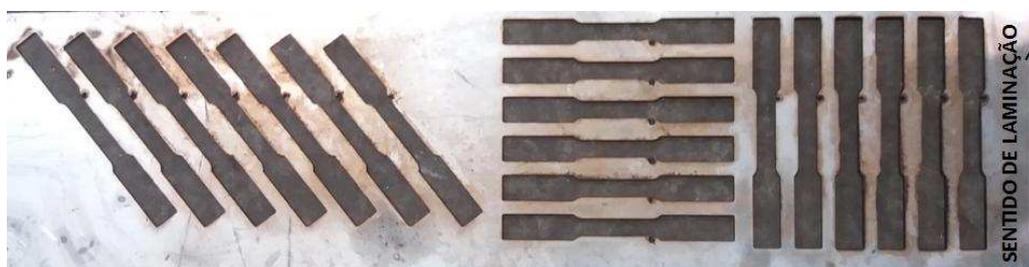
Baseado na norma ASTM E8 / E8M, os corpos de prova para ensaio de tração foram produzidos com o uso de uma máquina de corte a plasma da marca Silber Cutter, modelo 8000 operada por comando CNC, conforme Figura 16.

Figura 16 - Máquina de corte a plasma Silber Cutter



No total foram extraídos dezoito corpos de prova (Figura 17), obedecendo aos critérios pré-estabelecidos de quantidade de corpos de prova por sentido de laminação. Quinze unidades foram destinadas especificamente para o ensaio de tração até a ruptura e o restante das três unidades para os ensaios de tração a fim de identificar os índices de anisotropia.

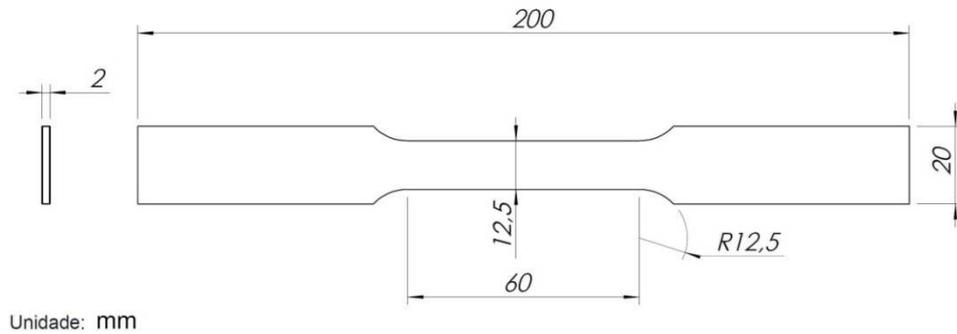
Figura 17 - Extração dos corpos de prova para ensaio de tração



As dimensões dos corpos de prova seguem os parâmetros indicados pela Norma ASTM E8 / E8M, conforme Figura 18, apresentando as seguintes dimensões: 2,00 mm de espessura; 20 milímetros de largura; raio de transição de 12,50 milímetros; seção central com

12,50 milímetros de largura e 60 milímetros de comprimento, e 200 milímetros de comprimento total.

Figura 18 - Medidas do corpo de prova para ensaio de tração



A Figura 19 mostra os quinze corpos de prova posicionados em relação ao sentido de laminação. Todos os CP's foram puncionados e numerados a fim de dar maior organização no controle dos resultados durante o ensaio de tração. As letras puncionadas indicam a posição do CP em relação ao sentido de laminação e os números de 1 a 5 apenas foram utilizados para numerar cada CP. Os CP's puncionados com a letra "A" foram extraídos no mesmo sentido de laminação da chapa, com a letra "C" os CP's extraídos à 45° do sentido de laminação e com a letra "E" os CP's à 90° do sentido de laminação.

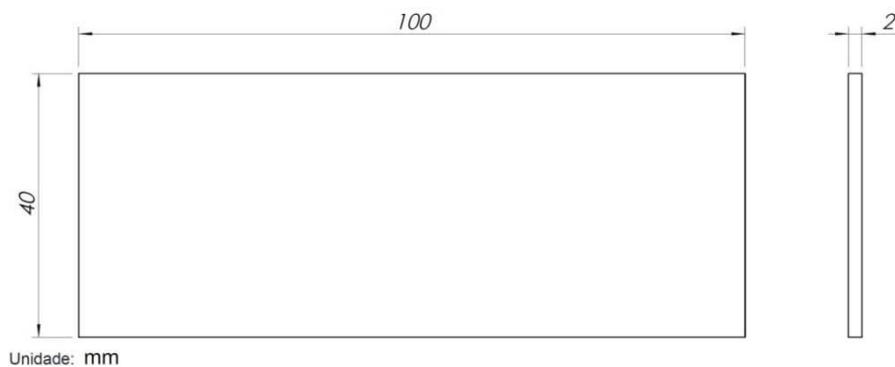
Figura 19 - Posição e identificação dos corpos de prova para ensaio de tração



3.1.3 Corpos de prova para ensaio magnético

Os corpos de prova para o ensaio magnético também foram cortados com o uso da máquina de corte guilhotina Sorg. Ao total foram extraídos quinze corpos de prova, cinco no sentido de laminação, mais cinco à 45°, e outros cinco à 90° do sentido de laminação da chapa, com as seguintes dimensões: 2 milímetros de espessura, 40 milímetros de largura e 100 milímetros de comprimento, conforme Figura XX.

Figura 20 - Corpo de prova para ensaio magnético



Em seguida, com o uso de uma dobradeira da marca Sorg (Figura 21), modelo DHS 160/30, fez-se a deformação à frio com diferentes ângulos de dobra. Nos corpos de prova em que houve deformação à frio, ela sempre foi realizada na região central do CP.

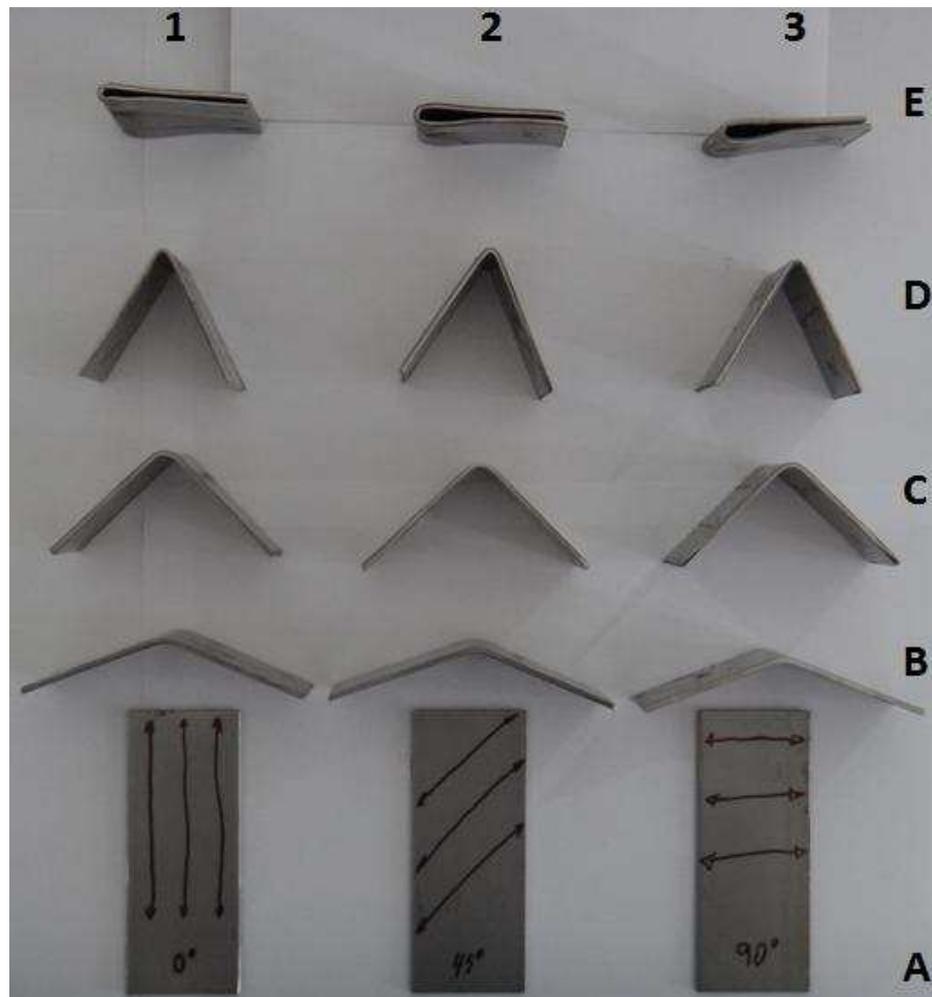
Figura 21 - Dobradeira Hidráulica Sorg



A Figura 22 apresenta todos os corpos de prova utilizados no ensaio magnético. Posicionados na coluna “1” localizam-se os CP’s que foram extraídos no mesmo sentido de laminação da chapa. Os CP’s localizados na coluna “2” foram extraídos à 45° do sentido de laminação e os CP’s da coluna “3” os que foram extraídos perpendicularmente ao sentido de laminação.

Ainda em relação à Figura 22, observa-se que um corpo de prova de cada sentido de laminação permaneceu sem ser deformado, conforme apresentados horizontalmente à indicação da letra “A”. Todos os demais CP’s passaram pelo processo de deformação à frio. Inicialmente, fez-se o dobramento com um ângulo de 45° em cada um dos CP’s indicados horizontalmente pela letra “B”. A letra “C” indica os CP’s que possuem um ângulo de dobra de 90° e a letra “D” os CP’s deformados com um ângulo de 125°. Já os CP’s indicados pela letra “E” foram submetidos a um dobramento de aproximadamente 180°.

Figura 22 - Corpos de prova para ensaio magnético



3.1.4 Corpos de prova para ensaio de micro dureza

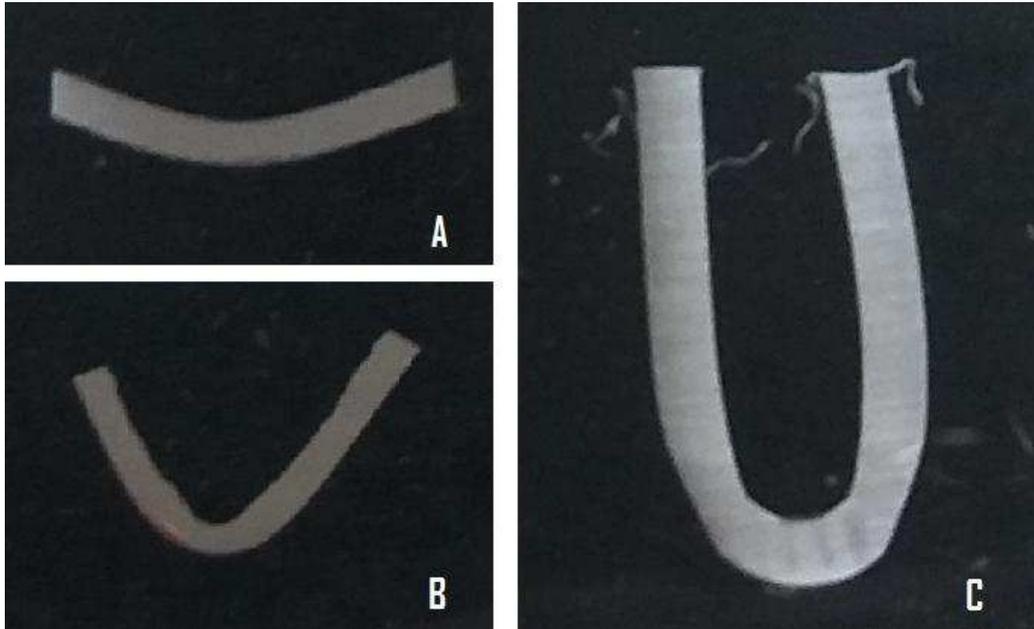
Os corpos de prova para o ensaio de micro dureza foram cortados com o auxílio de uma cortadeira metalográfica da marca Teclago, modelo CM 80 (Figura 23). Foram extraídos três corpos de prova oriundos dos corpos de prova utilizados no ensaio magnético. Portanto, os resultados obtidos no ensaio magnético determinaram quantos e quais CP's deveriam ser utilizados para o ensaio de dureza. Para estes CP's não foram definidas medidas específicas ou normatizadas, apenas tentou-se manter um padrão geométrico similar para as três unidades.

Figura 23 - Cortadeira metalográfica Teclago



Na Figura 24 têm-se os corpos de prova extraídos para o ensaio de micro dureza a partir dos CP's do ensaio magnético. O CP indicado com a letra "A" é oriundo do corpo de prova com ângulo de dobra de 45° e que foi extraído à 45° do sentido de laminação. O CP indicado com a letra "B" é proveniente do CP com ângulo de dobra de 125° e que foi extraído à 90° do sentido de laminação. O CP indicado com a letra "C" é oriundo do CP com ângulo de dobra de 180° e que foi extraído no mesmo sentido de laminação da chapa.

Figura 24 - Corpos de prova para ensaio de micro dureza



3.2 Análise Metalográfica

A análise metalográfica busca relacionar a estrutura interna de um material com as suas propriedades físicas, com o processo de fabricação e com o desempenho de suas funções (ROHDE, 2010).

Para a análise metalográfica, foram verificados dois corpos de prova produzidos exclusivamente para esta etapa, a fim de identificar a sua microestrutura e confirmar o sentido de laminação do material, em função da organização e orientação dos grãos.

3.2.1 Corte

O corte é a primeira etapa da análise metalográfica, que normalmente ocorre com o auxílio de uma cortadeira metalográfica, conforme máquina indicada no item 3.1.4. Porém, neste trabalho, os CP's da análise metalográfica foram cortados com o auxílio de uma máquina de corte guilhotina, conforme indicado no item 3.1.1.

3.2.2 Embutimento

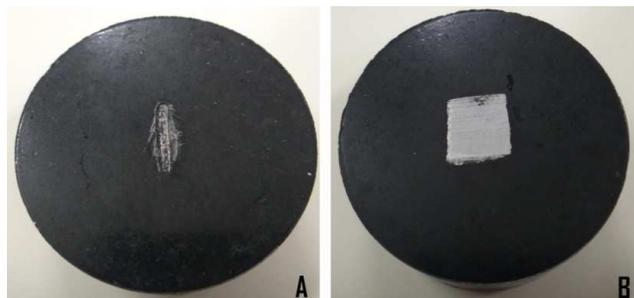
Na segunda etapa fez-se o embutimento, realizado com resina de baquelite em uma embutidora da marca Teclago, modelo EM40D (Figura 25), com controle de temperatura e pressão constante até seu resfriamento para posterior manuseio.

Figura 25 - Embutidora
Teclago



Na Figura 26 têm-se os corpos de prova já embutidos, prontos para passarem pela etapa posterior, que é a de lixamento. O CP indicado pela letra “A” é oriundo da seção transversal da chapa e o CP indicado com a letra “B” é oriundo da seção longitudinal da chapa, ambos em estado inicial, conforme extraídos.

Figura 26 - Corpos de prova para análise
metalográfica embutidos



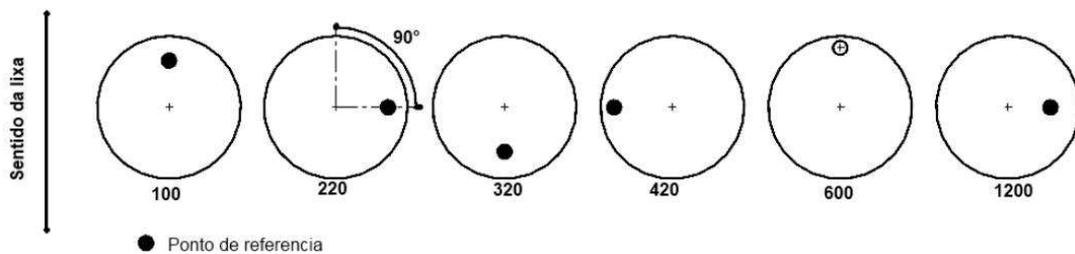
3.2.3 Lixamento

A terceira etapa é composta pelo lixamento, que é essencial no processo de preparação de uma superfície lisa e plana da amostra metalográfica para o subsequente polimento. Para isto, foi necessário lixar a amostra em uma lixadeira (Figura 27) com lixas de granulação cada vez menor, mudando de direção (90°) em cada mudança de lixa até desaparecerem os traços da lixa anterior, conforme representação da Figura 28.

Figura 27 - Lixadeira manual



Figura 28 - Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados



Fonte: Rohde (2010, p. 15)

3.2.4 Polimento

O polimento, que é a quarta etapa, consiste na obtenção de uma superfície isenta de riscos, de modo a se obter uma imagem clara ao microscópio. Para isto, poliu-se a amostra

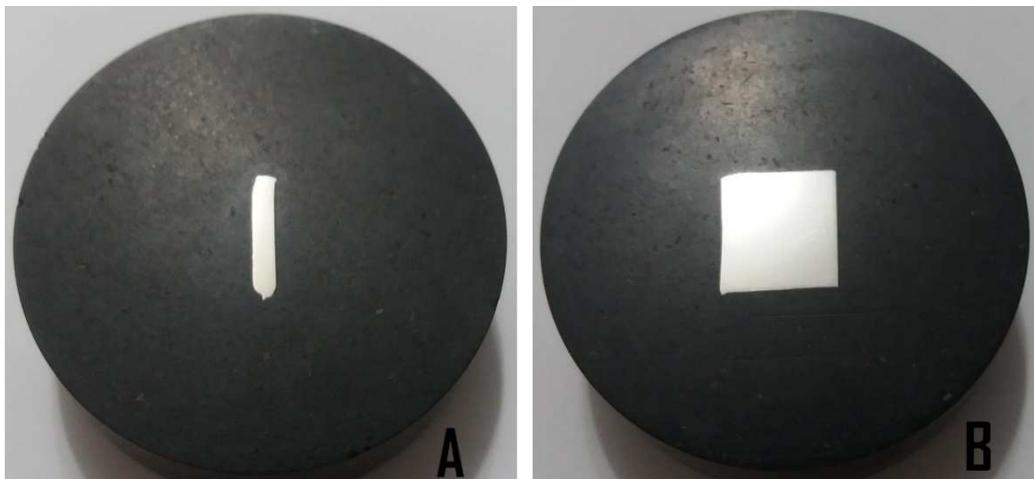
com material de granulação cada vez menor. O polimento mecânico foi feito pelo modo automático, onde a amostra foi fixada na Politriz lixadeira metalográfica da marca Teclago, modelo PL02 ED (Figura 29), e polida sobre a ação de cargas variáveis e Alumina.

Figura 29 - Politriz lixadeira metalográfica Teclago



Na Figura 30 tem-se o aspecto dos corpos de prova após o polimento, antes da etapa de ataque químico. O CP indicado pela letra “A” representa a seção transversal da chapa e o CP indicado pela letra “B” representa a seção longitudinal da chapa.

Figura 30 - Corpos de prova para análise metalográfica polidos



3.2.5 Ataque Químico

Na última etapa antes da visualização microscópica fez-se o ataque químico. Esta etapa foi realizada pelo Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS, seguindo seu procedimento interno GAF PE 002. Para revelar a microestrutura foi efetuado o ataque eletrolítico com o reagente químico a base de ácido oxálico.

3.2.6 Observação Microestrutural e Análise Química

O ensaio foi finalizado com o auxílio de um microscópio metalográfico e as análises também foram realizadas no LAMEF. Utilizou-se um microscópio ótico da marca Olympus, modelo BX 51M, com as micrografias obtidas através de uma câmera digital Olympus, modelo DP12, acoplada ao microscópio. Na análise química utilizou-se um espectrômetro de emissão ótica da marca Spectro, modelo Spectrolab tipo LAVFA18B.

3.3 Ensaio Mecânicos e Magnéticos

Para Souza (1982), a escolha do ensaio mecânico mais adequado ou mais interessante para cada produto metálico está diretamente relacionada com a finalidade do material, dos tipos de esforços que esse material irá sofrer e das propriedades mecânicas que se deseja medir. O ensaio de tração pode fornecer diferentes informações relacionadas ao material em estudo e o ensaio de micro dureza vem a complementar estas informações.

Ensaio magnéticos em aços inoxidáveis não são usualmente utilizados, visto que este tipo de material, em sua maioria, não é magnético. Para este trabalho, desenvolveu-se um método que visa avaliar os níveis de magnetismo após deformação à frio, pois segundo Chiaverini (2008), a anisotropia em alguns metais pode interferir nas propriedades magnéticas do material e o encruamento gerado durante o processo de laminação e deformação à frio, geram novos grãos com seus eixos cristalográficos em direções preferenciais. Sendo assim, a anisotropia e a direção dos cristais podem promover ao material melhores propriedades magnéticas em algumas direções.

3.3.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um método largamente difundido na indústria de componentes mecânicos em função de fornecer dados quantitativos referentes às características mecânicas dos materiais (DALCIN, 2007).

Como já mencionado no item 3.1.2, quinze corpos de prova foram confeccionados para o ensaio de tração. Os CP's confeccionados foram previamente tabelados com suas medidas originais. Após, cada CP foi fixado um a um na máquina de ensaio de tração da marca Pantec, modelo Versat 100 kN (Figura 31), e tracionados por uma carga uniaxial com velocidade de trinta milímetros por minuto. Os ensaios foram realizados baseados na norma ASTM E8 / E8M e ABNT NBR 6152.

Figura 31 - Máquina para ensaio de tração Pantec



Primeiramente foram ensaiados os cinco corpos de prova extraídos no mesmo sentido de laminação da chapa. Inicia-se o ensaio inserindo os parâmetros pré-estabelecidos para o

ensaio de tração no software e coletam-se, com auxílio de um paquímetro, as medidas de espessura e largura da região central útil do CP. Após, o CP foi fixado de forma adequada nas garras da máquina e o comando no painel de controle para o início do teste foi acionado. Assim, a força definida nos parâmetros era aplicada ao CP até sua ruptura. O mesmo procedimento foi aplicado para os cinco CP's extraídos à 45° do sentido de laminação e para os cinco CP's extraídos perpendicularmente ao sentido de laminação.

Ao final, os corpos de prova foram analisados fisicamente para a coleta das medidas finais de espessura e largura da região central útil e os gráficos de tensão X deformação de cada CP também foram gerados e verificados a fim de identificar os limites de escoamento e resistência mecânica do material.

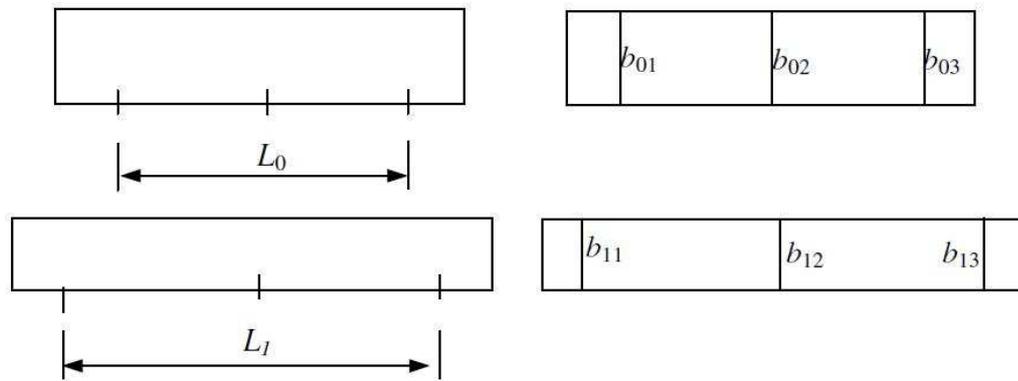
A coleta das medidas iniciais e finais de cada CP é de extrema importância, pois neste caso, foram utilizadas para calcular os índices de anisotropia, anisotropia média e planar. Este procedimento manual pode ocasionar distorções dos valores reais de anisotropia em função de possíveis falhas nas medições finais.

3.3.2 Ensaio de Anisotropia

O ensaio de anisotropia foi realizado com três corpos de prova, um para cada sentido de laminação, produzidos conforme descrito no item 3.1.2. Com base na norma SEW 1126, realizou-se as medições de comprimento e largura inicial de cada CP, e em seguida fez-se o ensaio de tração limitando-se a deformação em aproximadamente 20 %. Após, coletou-se as medidas finais de comprimento e largura.

A Figura 32 mostra esquematicamente a posição e a nomenclatura de cada ponto em que se realizaram as medições. Primeiramente mediu-se L_0 , que é o comprimento total útil inicial do corpo de prova. Após, realizou-se as medições de b_{01} , b_{02} e b_{03} , que é a largura inicial do CP para cada ponto indicado. Após o ensaio de tração, mediu-se L_1 , que é o comprimento final do CP e fez-se as medições de b_{11} , b_{12} e b_{13} , que se refere à largura final do CP em cada ponto indicado.

Figura 32 - Desenho esquemático para ensaio de anisotropia



Com todas as medidas coletadas, utilizou-se as equações 01, 02 e 03 citadas no item 2.3 da revisão bibliográfica para calcular o índice de anisotropia para cada sentido de laminação, a anisotropia média e planar.

3.3.3 Ensaio Magnético

O ensaio magnético foi realizado com os corpos de prova confeccionados conforme descrito no item 3.1.3. Este ensaio não segue uma norma específica e foi adotada uma metodologia, a fim de padronizar o ensaio, baseada no manual de instruções do equipamento utilizado para realizar as medições de variações do campo magnético dos CP's.

Para este ensaio, utilizou-se um Gaussímetro (Figura 33), tecnicamente conhecido como medidor de campo magnético, da marca Icel Manaus, modelo EM 8000. O equipamento pode operar na unidade de medida Gauss ou Tesla, e especificamente neste ensaio utilizou-se a unidade Gauss.

Neste ensaio, adotou-se como procedimento padrão o deslocamento do corpo de prova por aproximadamente 300 milímetros, até tocar com uma das faces no sensor do medidor de campo magnético. A Figura 34 demonstra esse procedimento, onde a imagem "A" mostra o ponto inicial da medição com afastamento de 300 milímetros do sensor, a imagem "B" com aproximadamente 150 milímetros de afastamento e na imagem "C" o CP toca o sensor.

Figura 33 - Gaussímetro Icel Manaus



Figura 34 - Procedimento de medição do campo magnético



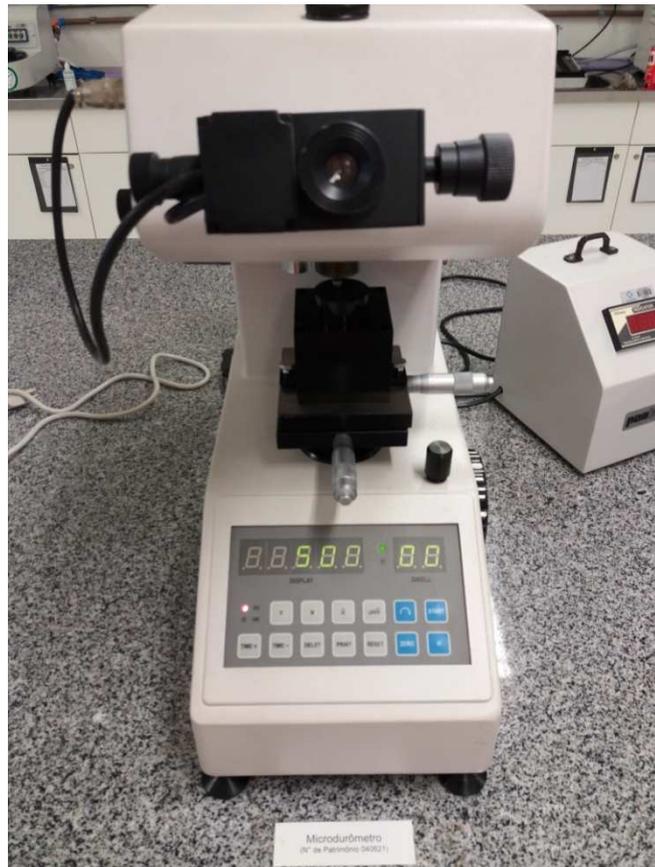
Ao aproximar o corpo de prova do sensor, o display do medidor inicia a indicação do valor do campo magnético, sendo adotado como medição final o valor indicado ao tocar o CP no sensor. Esse procedimento foi repetido três vezes para cada CP, a fim de identificar os

valores para cada medição e posteriormente tabelá-los, possibilitando o cálculo da média das medições de cada CP.

3.3.4 Ensaio de Micro Dureza

O ensaio de micro dureza na escala Vickers foi realizado com os corpos de prova confeccionados conforme descrito no item 3.1.4. Após o corte, os CP's foram embutidos em baquelite, passaram pela etapa de lixamento e posteriormente pelo polimento. Todas estas etapas seguiram o mesmo procedimento adotado na análise metalográfica, conforme indicado nos itens 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4. Após, com o uso de um microdurômetro (Figura 35) da marca Pantec, modelo HXD-1000TM, fez-se o ensaio de micro dureza seguindo o procedimento laboratorial.

Figura 35 - Microdurômetro Pantec

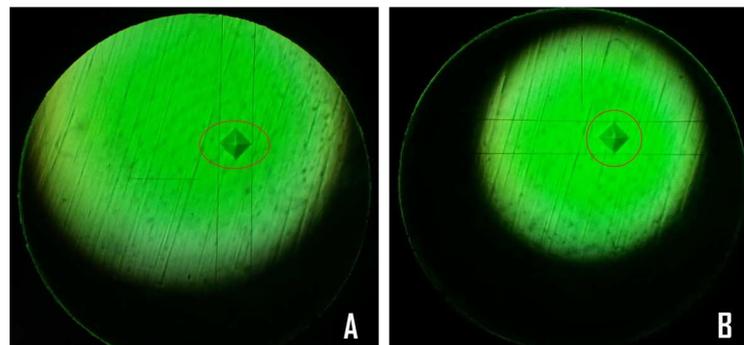


Primeiramente posicionou-se o corpo de prova na mesa do equipamento. Em seguida é realizado o posicionamento do ponto onde é feita a primeira indentação. Definindo-se o

ponto, é preciso encontrar o foco na lente principal, que é onde ocorre a medição das diagonais da pirâmide que é indented no CP. Obtendo-se o foco, indica-se a carga e o tempo de indentação, que neste caso foi de 100 gramas e 10 segundos, respectivamente. Com isso, a indentação é realizada no ponto pré-estabelecido, e retorna-se para a lente principal onde se medem as diagonais da pirâmide e obtém-se o valor de micro dureza para o ponto específico.

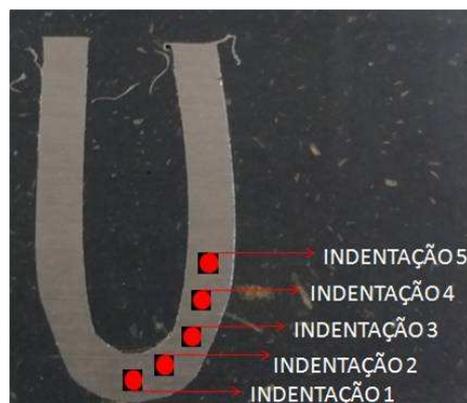
Na Figura 36 tem-se a ilustração da pirâmide e as arestas posicionadas para cada diagonal. Na imagem indicada com a letra “A” têm-se as arestas na posição vertical e na imagem indicada com a letra “B” têm-se as arestas na posição horizontal. As distâncias entre as arestas em cada posição são gravadas pelo equipamento, e utilizadas para o cálculo e fornecimento do valor final de micro dureza para o ponto em questão.

Figura 36 - Visão microscópica do ensaio de micro dureza



Foram realizadas cinco indentações em cada um dos três corpos de prova (Figura 37), gerando-se um perfil de dureza iniciando sempre na região central da área deformada e terminando em regiões mais afastadas da deformação.

Figura 37 - Posição das indentações



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados obtidos durante a execução deste trabalho são abordados. Os resultados referem-se à análise química e metalográfica, ensaio de tração e índices de anisotropia, ensaio magnético e ensaio de micro dureza.

4.1 Análise Química e Metalográfica

Com a análise química é possível identificar a composição química da amostra utilizada e, com a análise metalográfica, revelar a micrografia das seções longitudinal e transversal. A Tabela 9 apresenta os valores em porcentagem de massa para cada elemento encontrado na amostra e compara-se com os valores máximos indicados pelo fabricante. Nota-se que todos os valores encontrados estão de acordo com os indicados pelo fabricante, caracterizando-se assim que a amostra pertence à classe 304 dos aços inoxidáveis.

Tabela 9 - Composição química da amostra

		Valores do ensaio	Valores do fabricante
Elementos	C (%)	0,05	0,08 máx.
	Si (%)	0,42	0,75 máx.
	Mn (%)	1,16	2,00 máx.
	P (%)	0,035	0,045 máx.
	S (%)	0,013	0,030 máx.
	Cr (%)	18,27	18,00 - 20,00
	Mo (%)	0,06	-
	Ni (%)	7,92	8,00 - 10,50
	Co (%)	0,17	-
	Cu (%)	0,1	-
	Nb (%)	0,01	-
	Fe (%)	balanço	balanço

Nas Figuras 38 e 39 a micrografia referente aos corpos de prova em estudo é apresentada. Na Figura 38, tem-se a microestrutura da seção longitudinal referente ao CP apresentado no item 3.2.4, indicado na Figura 30 pela letra “B”. Já na Figura 39, tem-se a microestrutura da seção transversal referente ao CP apresentado no item 3.2.4, indicado na Figura 30 pela letra “A”. Em ambas as imagens observam-se os contornos de grão e algumas inclusões, destacadas pelos pontos pretos. Também observa-se um achatamento dos grãos na Figura 39, efeito característico originado no processo de laminação.

Figura 38 - Micrografia longitudinal do corpo de prova



Figura 39– Micrografia transversal do corpo de prova



4.2 Ensaio de Tração

Através do ensaio de tração é possível verificar os limites de escoamento, resistência à tração, alongamento e índices de anisotropia. Na Tabela 10, os valores de limite de escoamento, limite de resistência a tração e alongamento obtidos para cada corpo de prova pelo ensaio de tração são apresentados.

Tabela 10 - Valores de LE, LR e alongamento para cada corpo de prova

Sentido de laminação	Corpo de prova	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento (%)
0°	A1	333,75	638,63	66,95
	A2	333,95	635,77	66,10
	A3	331,70	641,03	70,10
	A4	335,63	630,61	63,52
	A5	326,35	635,03	70,12
45°	C1	332,12	624,43	73,53
	C2	332,10	608,90	67,80
	C3	334,68	603,15	65,65
	C4	333,59	623,23	70,20
	C5	340,15	598,08	64,93
90°	E1	326,95	629,73	71,62
	E2	328,46	643,06	73,10
	E3	330,11	631,30	71,47
	E4	325,83	636,78	73,53
	E5	328,60	638,04	71,37

Acredita-se que os valores obtidos são aceitáveis, visto que o fabricante indica um valor mínimo de 280 MPa para o limite de escoamento e um valor mínimo de 600 MPa para o limite de resistência à tração. Notam-se valores de alongamento compatíveis com o indicado pelo fabricante e de outras referências bibliográficas.

Na Figura 40, o gráfico de tensão vs deformação para os corpos de prova extraídos no mesmo sentido de laminação da chapa (A1 a A5) é apresentado. Nota-se um comportamento característico e similar da curva de tensão vs deformação para todos os corpos de prova. O patamar de escoamento variou de 326,35 MPa a 335,63 MPa. O limite de resistência à tração variou de 630,61 MPa a 641,03 MPa, sendo atingido em média com aproximadamente 67 % de alongamento.

Na Figura 41, os corpos de prova rompidos após o ensaio de tração são apresentados. Nota-se que a ruptura ocorreu em sua maioria na região próxima ao centro do corpo de prova,

com exceção de CP A3, que apresentou ruptura um pouco mais deslocada e próxima ao raio de transição.

Figura 40 - Gráfico de Tensão vs Deformação para CP's A1 a A5

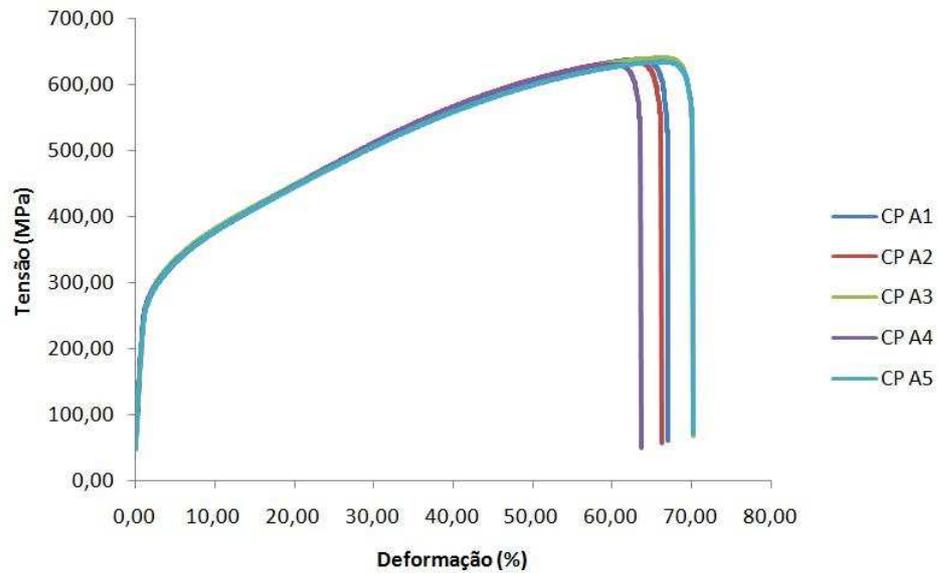


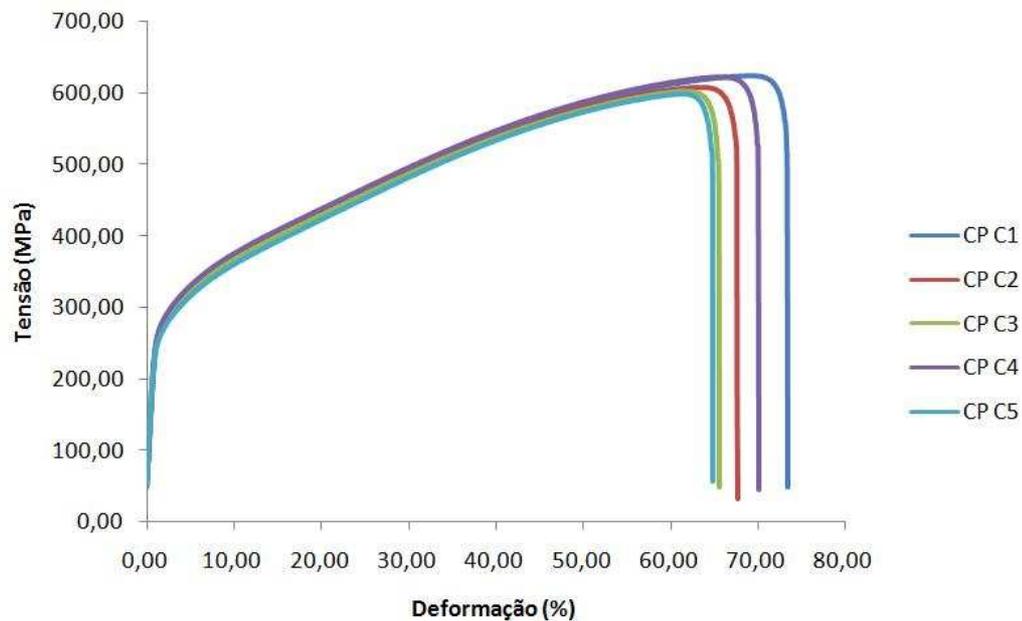
Figura 41 - Corpos de prova A1 a A5 rompidos



Na Figura 42, o gráfico de tensão vs deformação para os corpos de prova extraídos à 45° do sentido de laminação da chapa (C1 a C5) é apresentado. Nota-se um comportamento característico e similar da região inicial da curva de tensão vs deformação para todos os corpos de prova. A região final da curva apresenta variações em função dos diferentes limites de resistência à tração e de alongamentos um pouco distintos para cada CP.

O limite de escoamento variou de 332,10 MPa a 340,15 MPa. O limite de resistência à tração variou de 598,08 MPa a 624,43 MPa, sendo atingido em média com aproximadamente 69 % de alongamento.

Figura 42 - Gráfico de Tensão vs Deformação para CP's C1 a C5



O comportamento pouco similar da região final da curva de tensão vs deformação pode ser compreendido na Figura 43, que apresenta os corpos de prova rompidos, após ensaio de tração dos CP's C1 a C5. Nota-se que a ruptura ocorreu de forma desordenada, não se concentrando na região próxima ao centro do corpo de prova, e por vezes muito próxima da região de transição de largura do CP.

Figura 43 - Corpos de prova C1 a C5 rompidos



Na Figura 44 tem-se o gráfico de tensão vs deformação para os corpos de prova extraídos perpendicularmente ao sentido de laminação da chapa (E1 a E5). Como citado, para os CP's A1 a A5, também nota-se um comportamento característico e similar da curva de tensão vs deformação para todos os corpos de prova. O patamar de escoamento variou de 325,83 MPa a 330,11 MPa. O limite de resistência à tração variou de 629,73 MPa a 643,06 MPa, sendo atingido em média com aproximadamente 72 % de alongamento.

A Figura 45 apresenta os corpos de prova rompidos, após ensaio de tração. Nota-se que a ruptura ocorreu sempre na região próxima ao centro do corpo de prova, sem exceções.

Figura 44 - Gráfico de Tensão vs Deformação para CP's E1 a E5

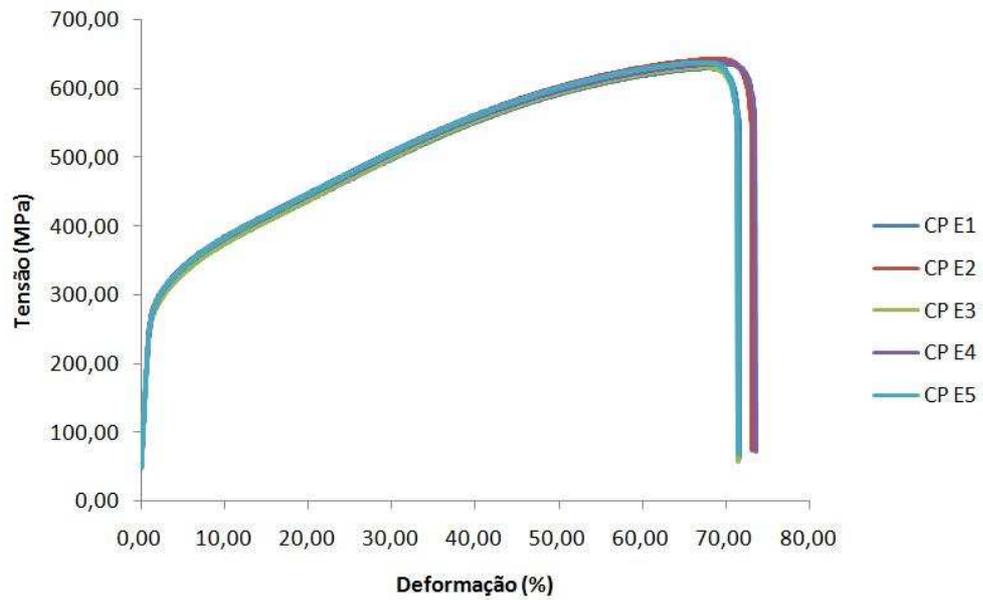


Figura 45 - Corpos de prova E1 a E5 rompidos

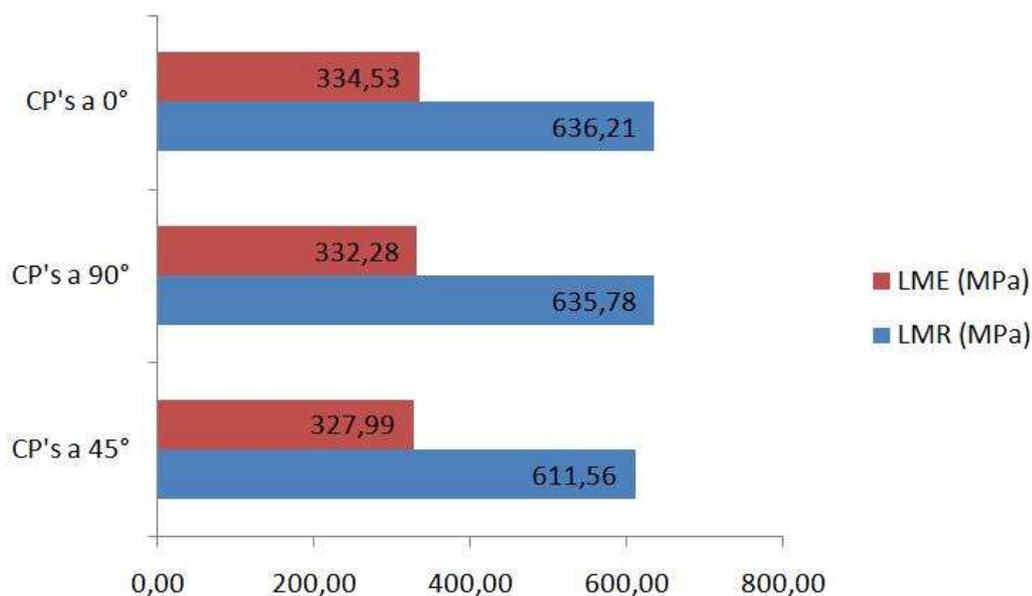


No gráfico apresentado na Figura 46, têm-se os valores médios para o limite de escoamento e para o limite de resistência à tração, por sentido de laminação. Fez-se a média dos resultados obtidos de cada CP por sentido de laminação, portanto, a média é composta por cinco valores em cada variável analisada.

Para os corpos de prova extraídos no mesmo sentido de laminação da chapa (CP's a 0°), obteve-se um valor médio de 334,53 MPa para o limite de escoamento e um valor médio de 636,21 MPa para o limite de resistência à tração. Para os corpos de prova extraídos perpendicularmente ao sentido de laminação (CP's a 90°), obteve-se um valor médio de 332,28 MPa para o limite de escoamento e um valor médio de 635,78 MPa para o limite de resistência à tração. Nota-se que para estes dois grupos de corpos de prova os valores médios são similares, indicando que o comportamento dos mesmos durante o ensaio foi padrão.

Já os corpos de prova extraídos à 45° do sentido de laminação (CP's a 45°), obteve-se um valor médio de 327,99 MPa para o limite de escoamento e um valor médio de 611,56 MPa para o limite de resistência à tração. Ambos os valores são levemente inferiores aos obtidos para os grupos de CP's anteriores, indicando um comportamento diferenciado no ensaio de tração.

Figura 46 - Valores médios de LE e LR por sentido de laminação



4.3 Índices de Anisotropia

Na Tabela 11, são apresentados os índices de anisotropia especificamente para o material em estudo. O valor de anisotropia (r) para o corpo de prova extraído no mesmo sentido de laminação da chapa foi de 0,87. Para o CP extraído à 45°, o valor de anisotropia foi de 0,99 e para o CP extraído perpendicularmente ao sentido de laminação o valor foi de 0,91. Estes índices, todos diferentes de 1, indicam que o material em estudo pode ser caracterizado como anisotrópico.

Os valores de anisotropia média e planar foram, respectivamente, 0,94 e -0,10. O fabricante e as referências bibliográficas não fornecem dados referentes aos valores de anisotropia do aço inoxidável AISI 304. Os índices foram calculados com o uso das equações 01, 02 e 03, conforme indicado no item 3.3.2.

Tabela 11 - Índices de anisotropia

		Sentido de laminação			
		0°	45°	90°	
Medições	b ₀	b ₀₁ (mm)	11,95	11,66	11,78
		b ₀₂ (mm)	11,65	11,78	11,78
		b ₀₃ (mm)	11,70	11,77	11,76
		Média b₀	11,77	11,74	11,77
	b ₁	b ₁₁ (mm)	11,32	11,06	11,13
		b ₁₂ (mm)	10,89	11,00	11,04
		b ₁₃ (mm)	11,14	11,08	11,11
		Média b₁	11,12	11,05	11,09
		l ₀ (mm)	60,00	60,00	60,00
		l ₁ (mm)	67,80	67,77	67,98
	r	0,87	0,99	0,91	
	rm		0,94		
	Δr		-0,10		

4.4 Ensaio Magnético

Para o ensaio magnético, a Tabela 12 apresenta os valores obtidos nas medições de variação do campo magnético após deformação à frio dos corpos de prova. Do total de quinze CP's, sete apresentaram variação do campo magnético. Dos sete CP's, apenas três (destacados em vermelho) foram considerados válidos no ensaio, visto que apresentaram valores iguais ou superiores a 0,30 mGauss.

Dos três corpos de prova válidos, o CP extraído perpendicularmente ao sentido de laminação da chapa e com um ângulo de dobra de 125° apresentou o maior valor de variação do campo magnético. Na média, para este CP, o valor foi de 1,27 mGauss. Os outros dois CP's válidos apresentaram um valor médio de 0,30 mGauss, sendo que um deles possui mesmo sentido de laminação da chapa e um ângulo de dobra de 180° e o outro foi extraído à 45° do sentido de laminação e possui um ângulo de dobra de 45°.

Tabela 12 - Medições de variação do campo magnético

		Ângulo de dobramento do corpo de prova					
		0°	45°	90°	125°	180°	
Verificações por sentido de laminação	0°	Medição 1	0,00	0,00	0,10	0,00	0,50
		Medição 2	0,00	0,00	0,10	0,00	0,20
		Medição 3	0,00	0,00	0,10	0,00	0,20
		Média	0,00	0,00	0,10	0,00	0,30
	45°	Medição 1	0,00	0,30	0,10	0,00	0,00
		Medição 2	0,00	0,30	0,10	0,10	0,00
		Medição 3	0,00	0,30	0,10	0,10	0,00
		Média	0,00	0,30	0,10	0,07	0,00
	90°	Medição 1	0,00	0,00	0,10	1,10	0,00
		Medição 2	0,00	0,00	0,10	1,70	0,00
		Medição 3	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
		Média	0,00	0,00	0,07	1,27	0,00

*Unidade de medida: mGauss

Acredita-se que a variação no campo magnético ocorra em função da deformação aplicada em cada corpo de prova, combinada ao sentido de laminação e com o ângulo de dobra. A deformação à frio no aço inoxidável pode alterar a estrutura cristalográfica com

possível alteração de fase. Esta alteração de fase pode originar e ocasionar a magnetização da região estudada.

Sabe-se também que a deformação à frio no aço inoxidável pode gerar encruamento e um conseqüente aumento de dureza na região deformada. Baseado nisto, fez-se o ensaio de micro dureza nos três corpos de prova validados no ensaio magnético, a fim de verificar os valores após deformação e elaborar o perfil de micro dureza para os CP's em questão.

4.5 Ensaio de Micro Dureza

Na Tabela 13, os valores de micro dureza Vickers para os três corpos de prova analisados são apresentados. Cinco indentações foram realizadas em cada CP, indicadas pelas posições 1 a 5. O primeiro CP (CP 45°/45°) ensaiado, que possui ângulo de dobra e sentido de laminação de 45°, apresentou valores de micro dureza na faixa de 272,21 a 263,52 HV 0.1. O segundo CP (90°/125°) ensaiado, que possui ângulo de dobra de 125° e é perpendicular ao sentido de laminação, apresentou valores de micro dureza entre 353,62 e 297,59 HV 0.1.

Já o terceiro CP (CP 0°/180°) ensaiado, que possui ângulo de dobra de 180° e mesmo sentido de laminação da chapa, apresentou os maiores valores de micro dureza. Como possui maior deformação, foi possível obter valores de micro dureza na faixa de 355,17 a 327,39 HV 0.1.

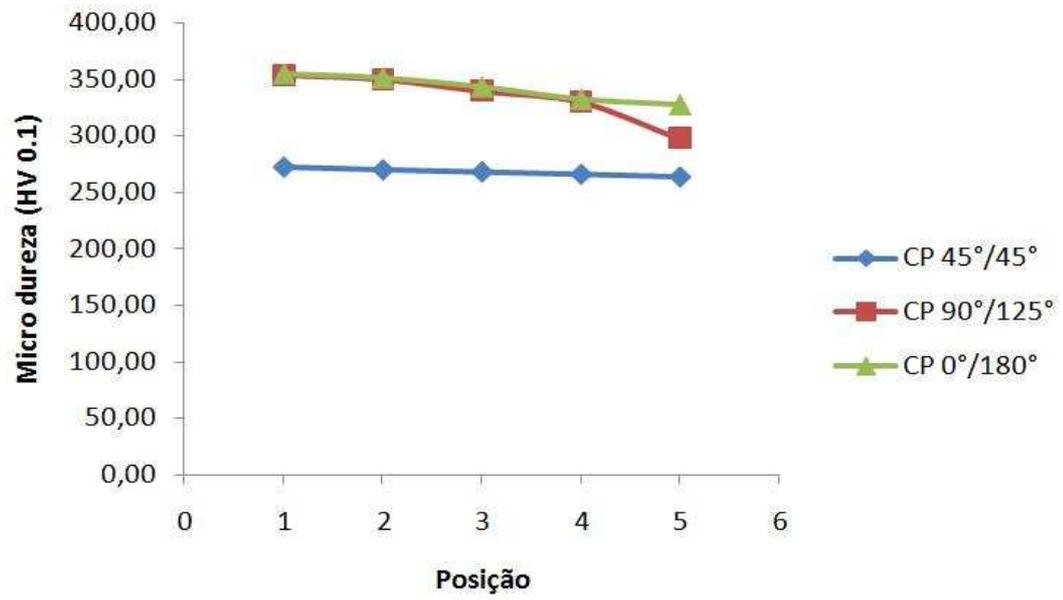
Tabela 13 - Valores de micro dureza

		Posição				
		1	2	2	4	5
Medições de micro dureza	CP 45°/45°	272,21	269,81	267,83	265,82	263,52
	CP 90°/125°	353,62	349,79	339,40	329,88	297,59
	CP 0°/180°	355,17	351,69	343,41	332,24	327,39

*Unidade de medida: HV 0.1

A Figura 47 apresenta o gráfico com o perfil de dureza para cada corpo de prova. Nota-se que os valores decrescem da posição 1 para a posição 5. Isso indica que possivelmente a deformação tenha aumentado a dureza na nos pontos analisados.

Figura 47 - Gráfico dos perfis de micro dureza



5 CONCLUSÕES

De acordo com o objetivo proposto, que consiste em analisar e verificar por meio de ensaios mecânicos e magnéticos a existência de influência da anisotropia na resistência mecânica, no limite de escoamento e no magnetismo do aço inoxidável AISI 304, são possíveis as seguintes constatações:

- Todas as análises e ensaios realizados apresentam resultados satisfatórios e fundamentam as conclusões deste estudo.
- Na análise química é possível verificar que a composição química da amostra está dentro dos limites aceitáveis para a classificação dos aços inoxidáveis AISI 304.
- Na análise metalográfica também verifica-se que as micrografias são nítidas, confirmando a orientação dos grãos quanto ao sentido de laminação.
- No ensaio de tração, acredita-se que os valores obtidos para o limite de escoamento não tiveram influência da anisotropia, perante a similaridade para qualquer sentido de laminação.
- Com relação aos valores de resistência à tração, obtidos pelo ensaio de tração, é possível afirmar que todos estão dentro do limite especificado pelo fabricante e referências bibliográficas. Ainda é possível verificar que os corpos de prova extraídos à 45° do sentido de laminação apresentaram um valor médio de resistência à tração levemente inferior aos demais corpos de prova.
- Os índices de anisotropia, obtidos com o auxílio do ensaio de tração, indicam que todos os corpos de prova são anisotrópicos. Porém, verifica-se que os corpos de prova extraídos à 45° do sentido de laminação apresentam índice de anisotropia que praticamente caracteriza o material como isotrópico neste sentido de laminação.

- No ensaio magnético, acredita-se que a anisotropia não está diretamente relacionada com as alterações de variação do campo magnético após deformação à frio dos corpos de prova.
- O magnetismo em aços inoxidáveis austeníticos só pode ocorrer por transformação de fase por deformação à frio. É difícil de prever com que grau de deformação a transformação de fase ocorre. Portanto, acredita-se que a magnetização ocorrida em alguns corpos de prova está relacionada ao grau de deformação e à alteração de fase do material na região deformada devido ao encruamento.
- O ensaio de micro dureza visa complementar o ensaio magnético. Os valores obtidos indicam um aumento de dureza na região deformada, efeito típico devido ao encruamento.
- De um modo geral, para este estudo, acredita-se que a anisotropia não tenha influência sobre o limite de escoamento, a resistência à tração e no magnetismo do aço inoxidável AISI 304.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de aperfeiçoar o presente trabalho, sugere-se as seguintes ações para dar continuidade a este estudo:

- Aprofundar o estudo e aprimorar os ensaios com relação ao magnetismo do aço inoxidável AISI 304 após deformação à frio.
- Realizar estudo com outras ligas de aços inoxidáveis, da classe 316 ou 430, visando comparar os resultados, tanto para magnetismo, como para os valores obtidos nos ensaios de tração para o aço inoxidável AISI 304.
- Calcular os índices de encruamento, a fim de identificar a capacidade de encruamento do aço inoxidável AISI 304.

REFERÊNCIAS

APERAM. **Catálogo – A versatilidade do inox.** 2013.

APERAM. **Catálogo – Aço inox – especificações técnicas.** 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5601: Aços inoxidáveis – Classificação por composição química.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6152: Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente.** Rio de Janeiro, 2002.

ASKELAND, D. R. **Ciência e engenharia dos materiais.** São Paulo: Cengage learning, 2013.

ASTM E3 – 11. **Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.** ASTM International, 2007.

ASTM E8 / E8M. **Standard Tests Methods for Tension Testing of Metallic Materials.** ASTM International, 2007.

BEER, F. P. et al. **Mecânica dos Materiais.** 7ª edição, Porto Alegre: AMGH, 2015.

BLUHM, J.I; MORRISEY, R.J. **Fracture in a tensile specimen,** First International Conference on Fracture, Japão: 1965.

CALLISTER, JR., W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada.** 2ª edição, Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos.** 7ª edição, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

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

- CULLITY, B. D. **Introduction to Magnetic Materials**. Menlo Park: Addison-Wesley, 1972.
- DALCIN, G.B. **Ensaio dos materiais**. Santo Ângelo: URI - Laboratório de ensaios mecânicos e materiais, 2010.
- DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2ª edição, Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- FERRARINI, J.L. **Caracterização de materiais para o processo de estampagem**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, 2004. (Tese, Mestrado).
- GARCIA, A. et al. **Ensaio dos materiais**. 1ª edição, Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- GODEFROID, L.B.; CANDIDO, L.C. **Ensaio mecânicos**. UFOP: Ouro Preto, 2006.
- HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2ª edição, São Paulo: Artliber Editora, 2005.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7ª edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **O aço – Processo Siderúrgico**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp>>. Acesso em: 31 out. 2016.
- KWUN, H.; BURKHARDT, G.L. **Effects of Grain Size, Hardness, and Stress on the Magnetic Hysteresis Loops of Ferromagnetic Steels**. V. 61, J. Appl. Phys., 1987.
- LLEWELLYN, D. T; HUDD, R. **Steels: Metallurgy & Applications**. Second edition, United Kingdom: Butterworth – Heinemann, 1994.
- MEYER, M.A.; CHAWLA, K.K. **Princípios de metalurgia mecânica**. 1ª edição, São Paulo: Edgard Blucher, 1982.
- MODENESI, P. J. **Soldabilidade de aços inoxidáveis**. Vol. 1. São Paulo: SENAI-SP, 2001.
- OKA, M. et al. **Non-Destructive Evaluation of Fatigue Damage in the Stainless Steel by Using Electromagnetic Methods**, Journal of Advanced Maintenance, v.1, 2009.
- RIZZO, E. M. Da S. **Processo de laminação dos aços: uma introdução**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.
- ROHDE, R.M. **Metalografia preparação de amostras**. Santo Ângelo: URI - Laboratório de ensaios mecânicos e materiais, 2010.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. 2ª edição, Porto Alegre: Imprensa Livre Editor, 2004.

SEW 1126. **Ermittlung der senkrechten Anisotropie**. (r-Wert) von Feinblech aus dem Zugversuch, Düsseldorf: Veriag Stahleisen. Alemanha: 1984.

SILVA, A. L. V. Da C. **Aços e ligas especiais**. 2ª edição, São Paulo: Blucher, 2006.

SOUZA, S. A. De. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5ª edição, São Paulo: Blucher, 1982.