

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

ERLAN SAMUEL SANTOS

ESTUDO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304
LAMINADO A FRIO EM SOLUÇÃO SALINA 3,5 %

BELO HORIZONTE

2022

ERLAN SAMUEL SANTOS

ESTUDO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304
LAMINADO A FRIO EM SOLUÇÃO SALINA 3,5 %

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

Orientador: Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

BELO HORIZONTE

2022

ERLAN SAMUEL SANTOS

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304
LAMINADO A FRIO EM SOLUÇÃO SALINA 3,5 %**

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

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont – Orientador

Prof. Dra. Aline Silva Magalhaes

Prof. Dr. Wellington Lopes

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar força em todos os momentos da vida e especialmente durante todo o período da graduação.

Agradeço aos meus pais Ernani e Fátima, meus irmãos Aislan e Ernani pelo incentivo e presença durante toda a vida.

Agradeço ao meu orientador, Marcello Dumont, pela dedicação durante esse processo, pela sua disponibilidade e prontidão durante todas as etapas.

Agradeço em especial ao Jorge Barbosa e a Isabella Rezende pelo auxílio em todos os momentos da execução deste trabalho. São parte importante para que tudo isso acontecesse.

Agradeço aos meus familiares e a todos os amigos do CEFET e IFMG – Campus Formiga, pela presença, incentivo e diversos ensinamentos. Aos colegas e amigos dos grupos “raiz” e “Parte Legal” que tiveram grande participação em minha formatura!

Agradeço aos funcionários e técnicos do CEFET, que me ajudaram durante a transferência de instituição de ensino. Sou grato a todos os coordenadores, funcionários e estagiários que sempre foram muito solícitos às minhas necessidades

Agradeço aos funcionários e técnicos do IFMG – Campus Formiga, que me auxiliaram durante o período de estudo na instituição até o pedido de transferência.

Agradeço à APERAM SOUTH AMERICA pelo apoio técnico e auxílio no desenvolvimento metodológico, em especial ao Dr. Wilian da Silva Labiapari.

RESUMO

A utilização de aços inoxidáveis é muito comum em meios onde é necessária a resistência à corrosão de um material. A demanda por esses materiais é crescente e para isso é importante aumentar as pesquisas que forneçam dados sobre a resistência a corrosão destes aços inoxidáveis após diferentes tipos de processamentos mecânicos. Este trabalho tem como objetivo estudar os efeitos da corrosão, em solução de 3,5% de NaCl, no aço inoxidável AISI 304 após conformação por laminação a frio com redução de espessura 20% e 50%. Foram avaliados os efeitos da deformação plástica na microestrutura e na resistência à corrosão. Utilizou-se chapas do aço inoxidável AISI 304 com espessura inicial de 3mm. Estas chapas foram inicialmente laminadas à frio e sofreram reduções adicionais de até alcançarem a redução de 20% e 50% em relação à espessura inicial. Para a caracterização das amostras foi realizada a análise química das amostras por emissão óptica de infravermelho. A análise da estrutural foi realizada por meio de microscopia óptica e difração de raios-X. Realizou-se ensaio de microdureza Vickers nas diferentes reduções de espessura. Para a obtenção dos dados das propriedades corrosivas desse material foi utilizado o ensaio de polarização potenciodinâmica para cada amostra. Após os ensaios percebeu-se quantidade crescente de martensita ao aumentar a deformação das amostras. Observou-se que não houve variações nos valores dos resultados convencionais de resistência à corrosão (E_{corr} , E_{pit} , I_{corr}) dos três grupos amostrais, indicando que não houve diferenças na resistência à corrosão do aço inoxidável AISI 304.

PALAVRAS-CHAVE: Aço inoxidável AISI 304, redução de espessura, laminação a frio, corrosão.

ABSTRACT

The utilization of stainless steels is very common in environments where corrosion resistance to the material is required. The demand for these materials are growing and it's important to increase new research, will provides data on the behavior of these steel for different types of mechanical process. This work aims to study the effects of reduction, in a 3% NaCl solution, without AISI 304 identification steel after compliance with the 20% and 50% thickness reduction. The effects of plastic formation on microstructure and corrosion resistance were obtained. Stainless steel plates AISI 304 with a thickness of 3mm were used. They were 20% laminated to the initial thickness and narrowed to the initial thickness. For the characterization of the samples, the chemical analysis of the infrared optical emissions was performed. The structure analysis was performed by means of optical microscopy and X-ray diffraction. The Vickers test was performed on the differences in thickness microhardness. To obtain data on the corrosive properties of this material, the potential polarization test was used for each sample. After forming the assays, increase the amount of martens in the samples. It was observed that there were no variations in the values of the conventional results of corrosion resistance (E_{corr} , E_{pit} , I_{corr}) of the three sample groups, indicating that there were no differences in the corrosion resistance of AISI 304 stainless steel.

KEYWORDS: AISI 304 stainless steel, thickness reduction, cold rolling, corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arco de Saint Louis com revestimento de aço inoxidável AISI 304	15
Figura 2 – Diferentes tipos de laminadores industriais	17
Figura 3 – Grãos encruados após processo de deformação a frio	18
Figura 4 – Tipos de corrosão por pite	20
Figura 5 – Reações eletroquímicas entre meio e metal	21
Figura 6 – Caminho iônico e corrente elétrica	22
Figura 7 – Curva de polarização potenciodinâmica.	23
Figura 8 – Fluxograma do processo experimental	24
Figura 9 – Fluxograma de laminação a frio AISI 304	25
Figura 10 – Esquema de montagem da célula eletroquímica	28
Figura 11 – Micrografia aço AISI 304 da amostra 0% como recebido	30
Figura 12 – Micrografia aço AISI 304	31
Figura 13 – Difração de Raio X AISI 304, com diferentes deformações (%)	32
Figura 14 – Estimativa fração volumétrica proporcional das fases do AISI 304 para as reduções de espessura (%).	33
Figura 15 – Microdureza Vickers do aço AISI 304 com diferentes reduções de espessura (%)	34
Figura 16 – Montagem da célula eletroquímica em laboratório	35
Figura 17 – Curvas de polarização potenciodinâmica de todas as amostras de AISI 304	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química típica do aço AISI 304	16
Tabela 2 – Resistência à formação de pite com adição de elementos de liga nos aços inoxidáveis	19
Tabela 3 – Composição química após análise da amostra do aço AISI 304.	30
Tabela 4 – Estimativa fração volumétrica das fases do AISI 304 com diferentes reduções de espessura (%)	33
Tabela 5 – Resultado da microdureza Vickers no aço AISI 304 com diferentes reduções de espessura (%)	34
Tabela 6 – Resultado da polarização potenciodinâmica do AISI 304 com as reduções de espessura de 0, 20 e 50%	36

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - American Iron and Steel Institute API American Petroleum Institute

ASTM - American Society for Testing and Materials

CCC - Cúbica de corpo centrado

CFC - Cúbica de face centrada

CR - Laminado a frio

DRX - Difração de Raios X

MO - Microscópio Ótico

OCP - Potencial de Circuito Aberto

E_{corr} - Potencial de corrosão

I_{corr} - Corrente de corrosão

E_{pite} - Potencial de pite

β_a - Constante de Tafel anódica

β_c - Constante de Tafel catódica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Aço inoxidável	14
3.2	Aços inoxidáveis austeníticos	14
3.3	Laminação a frio	16
3.4	Resistência à corrosão dos aços inoxidáveis	18
3.4.1	Técnica eletroquímica de polarização	20
3.4.2	Curvas de polarização potenciodinâmica	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Materiais	24
4.2	Metodos	24
4.2.1	Laminação a frio para obtenção de diferentes reduções de espessura	24
4.2.2	Análise química	25
4.2.3	Análise metalográfica	26
4.2.4	Ensaio de Difração de Raios X	26
4.2.5	Dureza	27
4.2.6	Resistência à corrosão	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5.1	Análise química	30
5.2	Análise metalográfica AISI 304	30
5.3	Difração de Raios X do aço AISI 304	32
5.4	Dureza Vickers AISI 304	34
5.5	Ensaio de Corrosão	35
6	CONCLUSÕES	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

A busca por aços que sejam mais resistentes à corrosão tem sido a motivação para muitas pesquisas na engenharia. Muitos buscam aperfeiçoar as ligas existentes, ou criar novas ligas, a fim de diminuir e melhorarem a resposta dos materiais à esta atividade eletroquímica que modificam a estrutura e o comportamento de um material (CHIAVERINI, 2008).

A maioria dos aços inoxidáveis austeníticos utilizados é de aços da série 300, que têm em sua composição cromo e níquel, além de outros elementos de liga. São aços que não são magnéticos e têm como características mecânicas um boa tenacidade e ductilidade em diferentes temperaturas e apresentam, em geral, elevada resistência à corrosão, dentre os aços inoxidáveis (CAMPBELL, 2007).

Os aços austeníticos, possuem o teor de cromo que podem estar entre 16% e 30% de massa, possuem o teor de carbono inferior a 0,15% e ao adicionar níquel com teor na faixa de 8% a 35%, formam a melhor combinação entre propriedades mecânicas e resistência a corrosão. Porém com a adição destes elementos de liga o seu custo de fabricação torna-se elevado, o que levou ao desenvolvimento de outras ligas como os aços inoxidáveis ferríticos (CHIAVERINI, 2008; SILVA; MEI, 2010).

A corrosão ocorre quando há um ataque gradual e contínuo de um metal por parte do meio que pode ser a atmosfera ou um meio químico, líquido ou gasoso. O resultado das reações que ocorre entre os metais com outros compostos não-metálicos gera uma mudança gradual do metal em um, ou vários, compostos químicos, que são geralmente óxidos ou sais. (CHIAVERINI, 2008).

A passivação utiliza o cromo presente na liga para formar uma película de óxidos e hidróxidos na superfície do metal. A película passivadora de óxidos (Cr_2O_3) e hidróxidos de cromo é resistente e uniforme, possui altíssima aderência ao material e boa plasticidade, além de apresentar superfície com baixa porosidade, é pouco volátil, e possui baixa solubilidade. Sua resistência à corrosão aumenta em meios oxidantes e ao aumentar a quantidade de cromo na liga. Em meios redutores, ou com baixa quantidade de oxigênio, poderá haver ruptura da camada passivadora, resultando em corrosão localizada por pites, em frestas ou corrosão sob tensão. Deve-se observar também o acabamento da superfície e irregularidades, a fim de aumentar também a sua resistência à corrosão (TELLES, 2003).

O aço inoxidável, como os metais em geral, possui grande importância na tecnologia moderna isso deve-se à facilidade com que podem ser conformados em formas úteis, tais como tubos, barras e chapas finas. Nos processos do tipo compressão direta a força é aplicada à

superfície do material e este escoa perpendicularmente à direção de compressão, a laminação é um exemplo deste tipo de processo (DIETER, 1981).

Ao sofrer o processo de conformação mecânica é comum que o material sofra mais de um tipo de esforço, essa combinação provoca uma mudança na trajetória de deformação plástica e, conseqüentemente uma mudança do comportamento mecânico do material. A maioria dos materiais metálicos muda sua resposta mecânica em função das solicitações mecânicas que foram submetidos (APERAM, 2015; SILVA, 2010).

Este trabalho contribuiu para a ampliação das pesquisas sobre o aço inoxidável AISI 304 após o processo de laminação a frio. Verificou-se a corrosão após um processo de laminação a frio com 0%, 20% e 50% na redução de espessura, o que será de suma importância para possíveis correlações da corrosão com as deformações em processo de estampagem.

Foi avaliado o comportamento da resistência à corrosão em solução aquosa de NaCl 3,5%. Outros ensaios foram realizados para determinação da composição química da liga, avaliação da microestrutura, avaliação de fases formadas nas reduções de espessura, A resistência à corrosão foi avaliada por meio de ensaios eletroquímicos e pela análise das curvas de polarização.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar a resistência à corrosão do aço inoxidável AISI 304, em solução de 3,5% de NaCl, após sofrerem conformação adicional por laminação a frio de 0%,20% e 50% de redução de espessura.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar a microestrutura do material por meio de microscopia óptica nas reduções de espessura de 0%,20% e 50%;
- Avaliar a estrutura do material por meio de difração de raios X nas reduções de espessura de 0%,20% e 50%;
- Analisar os resultados da dureza do material através de ensaio de microdureza Vickers em seus diferentes níveis de redução de espessura;
- Avaliar o comportamento corrosivo do material por meio de ensaios eletroquímicos de polarização potenciodinâmica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço inoxidável

Denominam-se, genericamente, de aços inoxidáveis os aços que não enferrujam, mesmo pela exposição prolongada a uma atmosfera normal. O cromo é o elemento de liga básico dos aços inoxidáveis, cuja passivação é conseguida pela formação de uma película de óxidos e hidróxidos de cromo na superfície do metal. Os aços inoxidáveis são, portanto, aços de alta liga, contendo 12 a 26% de Cr e até 22% de Ni. Possuem custo maior comparados aos aços-carbono e os aços de baixa liga (TELLES, 2003).

A película passivadora é resistente e uniforme, tem excelente aderência e plasticidade, baixa porosidade e volatilidade e solubilidade praticamente nulas. O grau de inoxidabilidade ao aço depende da estabilidade dessa película, que tem uma espessura média de cerca de 0,02µm (TELLES,2003).

Os aços inoxidáveis podem ter outros elementos de liga que influenciam sua microestrutura e propriedades. Como as propriedades dos materiais são dependentes da sua microestrutura, os aços inoxidáveis são classificados, de modo geral, de acordo com a microestrutura que apresentam a temperatura ambiente. Desse modo, os aços inoxidáveis são classificados em: ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex, endurecíveis por precipitação (SILVA; MEI, 2010; ROSA, 2006).

O aço inoxidável possui características de boa ductilidade, resistência mecânica e resistência à corrosão, outras características importantes são: durabilidade; resistência a temperaturas elevadas; excelente performance quando soldado; alta conformabilidade; é um material 100% reciclável; baixo custo de manutenção; as deformações permanentes não comprometem suas características; fácil limpeza além de serem tipicamente inertes. As boas características, porém, fazem com que o aço inoxidável apresente um custo mais elevado que aços carbono e de baixa liga (APERAM,2021; FONSECA,2017; MESQUITA, 1997).

3.2 Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são aços que não possuem magnetização e podem se beneficiar de endurecimento após algum trabalho mecânico. Possuem uma maior resistência à corrosão, através da presença do níquel em sua composição e são facilmente conformados a frio (MESQUITA, 1997). Estes aços possuem o teor de cromo entre 16% e 30 %, níquel com

teor na faixa de 8% a 35% e o teor de carbono inferior a 0,15%. O controle destes elementos e o acréscimo de outros elementos de liga buscam o equilíbrio entre as propriedades do material (CHIAVERINI,2008; SILVA, 2010).

Há uma diversidade de aços inoxidáveis austeníticos. Estes aços são, geralmente, classificados pelo AISI (*American Iron and Steel Institute*) em dois grupos denominados de “serie 300” e “serie 200”. A série 300 é considerada a mais importante. Na série 200, o níquel tem o seu teor reduzido e adiciona-se à liga o manganês, tendo esses materiais até 6% de Ni e até 15% de Mn (TELLES, 2003). Esta liga possui a estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC) retida a temperatura ambiente, sendo estabilizada devido ao níquel, ou manganês, que são elementos gamagênicos na sua composição (MATHEUS, 2006; KRAUSS, 2005).

Além da alta resistência à corrosão outras características destes aços inoxidáveis são: facilmente soldáveis, possuem alta ductilidade, não são endurecíveis com tratamento térmico e são adequados para trabalho a baixas e altas temperaturas inclusive aplicações criogênicas (APERAM, 2015, KRAUSS, 2005; MATHEUS, 2006; SILVA E MEI, 2010).

Sendo os aços austeníticos da série 300 os mais utilizados, a composição mais conhecida é dos aços 18-8 (18% Cr e 8%Ni), por sua excelente resistência à corrosão, ductilidade e soldabilidade (CARBÓ, 2008). São utilizados para fins estruturais, equipamentos para indústria alimentícia, aeronáutica, ferroviária, petrolífera, química e petroquímica, papel e celulose, construção civil, etc. O aço típico desta família é o AISI 304, um exemplo de sua utilização está demonstrado na Figura 1 (MESQUITA 1997).

Figura 1 – Arco de Saint Louis com revestimento de aço inoxidável AISI 304.



Fonte: AÇO MARANHÃO, 2022

A composição química típica de um aço AISI 304 está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química típica do aço AISI 304.

Elemento Químico	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Outros elementos
Teor (%)	<0,08	<2,00	<0,045	<0,030	1,00	17,50 a 20,00	8,00 a 10,50	-	-

Fonte: ABNT NBR 5601, 2011.

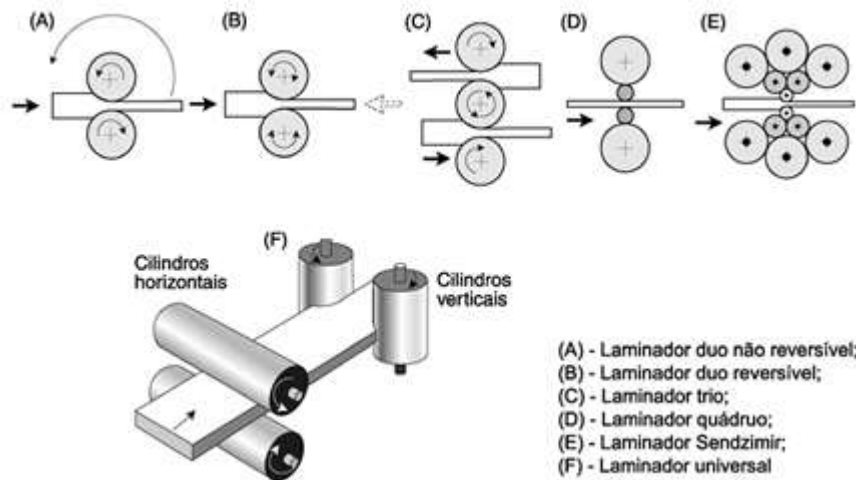
3.3 Laminação a frio

A laminação é o processo da deformação plástica dos metais onde o material passa entre cilindros. Possui alta produtividade e controle dimensional com alta precisão, sendo um dos processos de conformação mais utilizados. O metal é submetido a altos valores de tensões compressivas, resultantes da ação do esforço compressivo dos cilindros de laminação e às tensões cisalhantes superficiais, resultantes da fricção entre os cilindros e o material. As forças de fricção são também responsáveis pelo ato de puxar o metal (DIETER, 1981).

A laminação a quente é responsável pela redução ou desbaste inicial dos lingotes em blocos ou tarugos. Em uma nova etapa de laminação a quente o material é transformado em chapas grossas, chapas finas, vergalhões, barras, tubos, trilhos ou perfis estruturais, dando pré-forma ao produto. Após ocorre a laminação a frio onde a redução de área pode ser de 30 a 70% dependendo do metal, da área e temperatura inicial. A função da laminação a frio é obter espessura e acabamento superficial adequado de um produto e fornecer energia suficiente para que o material seja recristalizado na etapa posterior de recozimento. As deformações a frio afetam as propriedades mecânicas e as condições de recristalização dos aços no recozimento (CORASSINI, 2012, DIETER, 1981).

Na Figura 2 são mostrados os diferentes tipos de laminadores utilizados nas indústrias para obtenção de um material.

Figura 2 – Diferentes tipos de laminadores industriais.



Fonte: ABAL, 2022.

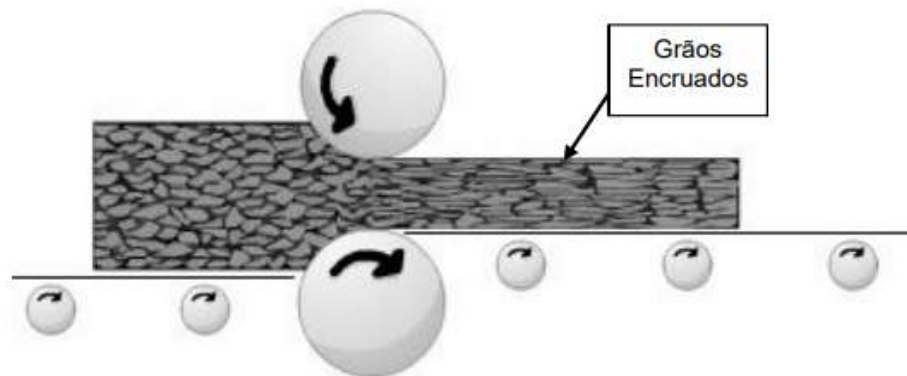
A redução de área e temperatura de recozimento são os parâmetros os mais importantes em um processo de laminação, após pode-se realizar o tratamento térmico que altera as propriedades mecânicas do material. A deformação, o tamanho de grão e a orientação cristalográfica afetam as propriedades mecânicas de um material na laminação a frio. A distribuição e número de discordâncias inseridas também afetarão estas propriedades no material (ZHA et al, 2014).

No processo da laminação a frio criam-se discordâncias no reticulado cristalino do metal, que são defeitos lineares relacionados ao encruamento do material. Essas discordâncias são responsáveis pelo fenômeno de deslizamento entre planos de átomos na rede cristalina do metal e estão diretamente associadas à deformação plástica máxima que será efetuada. Aços com baixo teor de carbono podem apresentar maior propensão à formação de discordâncias sob deformação plástica (FILHO, A. F. et al, 2001; CORASSINI, 2012).

O encruamento de um material causa aumento da resistência a tração, limite de escoamento e diminuição da elongação. A diminuição da mobilidade das discordâncias causa o endurecimento no material. O endurecimento é resultado, por exemplo, do aumento da densidade de discordâncias, átomos de soluto, refinamento dos grãos e transformações de fase (OLIVEIRA, 2009; CORRÊA, 2004).

A Figura 3 demonstra a alteração da morfologia dos grãos com o alongamento por efeito da deformação a frio do material. Esta deformação torna os grãos encruados.

Figura 3 – Grãos encruados após processo de deformação a frio.



Fonte: MORO, 2007

Uma discordância tem movimento livre sob ação de uma força caso não possuam obstáculos. Estes obstáculos pode ser contornos de grão com orientações cristalográficas distintas, defeitos pontuais, lacunas, precipitados, entre outros. Ao movimentarem promovem o deslizamento de planos cristalográficos específicos de maior densidade atômica, originando bandas de deformação. Por definição, as bandas de deformação são caracterizadas por deformações heterogêneas do reticulado, devido às partes diferentes de um mesmo grão sofrerem rotações distintas durante a deformação e são comuns na microestrutura de metais deformados a frio (DIETER, 1981).

Por ser um processo que ocorre abaixo da temperatura de recristalização, há um aumento na resistência a deformação causado pelo encruamento do aço, levando à diminuição no grau de redução nas seções transversais da peça. A dureza do aço cresce com o aumento da deformação, associada ao encruamento ou às prováveis precipitações. Um exemplo de microestrutura típica de um material encruado apresentará grãos deformados no sentido da laminação, com destaque para a presença de maclas (MARQUES, et al, 2020).

3.4 Resistência à corrosão dos aços inoxidáveis

A corrosão tem gerado prejuízos financeiros e operacionais consideráveis, além de danos ao meio ambiente e riscos à saúde das pessoas. Este fenômeno tem destaque como um dos grandes problemas atuais nas indústrias pela deterioração dos equipamentos. Como definição, a corrosão é o processo de degradação do material proveniente de ações química ou eletroquímica do meio ambiente. O processo corrosivo ocorre de forma espontânea e promove

alterações prejudiciais ao material ao ponto de inutilizá-los. A corrosão pode ou não estar aliada a esforços mecânicos no material (GENTIL, 2008) (SOUZA, et al,2017).

A corrosão eletroquímica consiste em uma reação anódica-catódica. Na reação anódica os íons do metal são dissolvidos e transferidos para a solução na forma de íons, já na reação catódica ocorre a redução do metal. O eletrólito é o líquido condutor que estará em contato com o material, sendo a principal condição para que ocorra o processo de corrosão. O circuito elétrico é fechado por condução iônica através do eletrólito. Na corrosão úmida o mecanismo tipicamente é eletroquímico (SOUZA, 2020).

Os aços inoxidáveis possuem excelente resistência a corrosão e por isso tem uma alta utilização. Esta resistência está relacionada à sua composição química e à formação da sua camada passiva que recobrirá a sua superfície. Esta camada passivadora faz com que o aço inoxidável tenha um comportamento semelhante a um metal nobre, inerte em várias situações de corrosão. Um rompimento da película pode gerar uma corrosão localizada na peça por um dos seguintes tipos de corrosão: por pites, intersticial, e sob tensão. Já na composição química, a adição de elementos de liga aos aços pode alterar a resistência à corrosão. Na Tabela 2 estão relacionados a resistência à corrosão por pite com a adição de elementos de liga (GENTIL,2008).

Tabela 2 – Resistência à formação de pite com adição de elementos de liga nos aços inoxidáveis.

Elemento	Resistência a formação de Pites
Carbono	Diminui, especialmente nos aços sensibilizados
Cromo	Aumenta
Enxofre e Selênio	Diminui
Molibdênio	Aumenta
Níquel	Aumenta
Nitrogênio	Aumenta
Silício	Diminui, aumenta na presença de Mo
Titânio e Nióbio	Diminui em FeCl ₃ ; sem efeito em outros meios

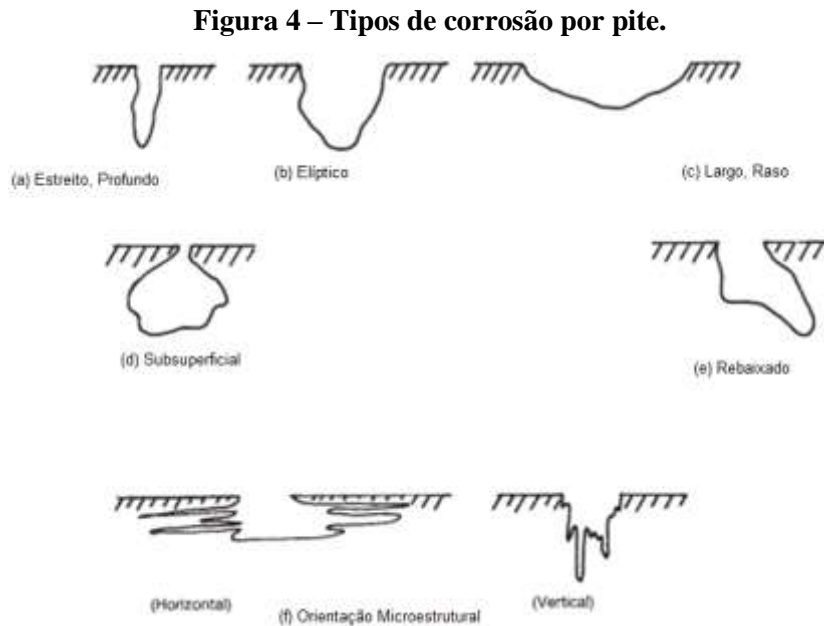
Fonte: GENTIL, 2008 (Adaptado)

As ligas de aços inoxidáveis austeníticos possuem alta resistência à corrosão e são desenvolvidas visando essa propriedade. Até temperaturas moderadas, esses aços são completamente inertes em relação à água doce, atmosfera em geral e vapor de água e outros. São inalteráveis em contato com meios pouco corrosivos, como óleos vegetais, produtos

alimentares e farmacêuticos em geral, bem como soluções salinas neutras ou alcalinas, principalmente quando de sais oxidantes. Aços com maiores quantidades de cromo ou molibdênio são melhores que os demais, para essas finalidades (TELLES, 2003).

Os aços inoxidáveis austeníticos, em geral, possuem maior resistência a corrosão em ambientes de atmosfera industrial ou em meios ácidos, apresentam uma superfície brilhante e praticamente isenta de produtos de corrosão, porém na presença de cloretos sofrem ataque localizado de corrosão por pite. A manifestação da corrosão por pite e corrosão intersticial se dá em menor extensão quando os teores mínimos de 23% de cromo e 2% de molibdênio são obedecidos (PECKER, et al.,1977; GENTIL,2006).

A Figura 4 indica os diferentes tipos de corrosão por pites, demonstrando os principais formatos segundo a Norma ASTM G46-94 de 2005.



Fonte: ASTM G46-94, 2005 (Adaptado)

3.4.1 Técnica eletroquímica de polarização

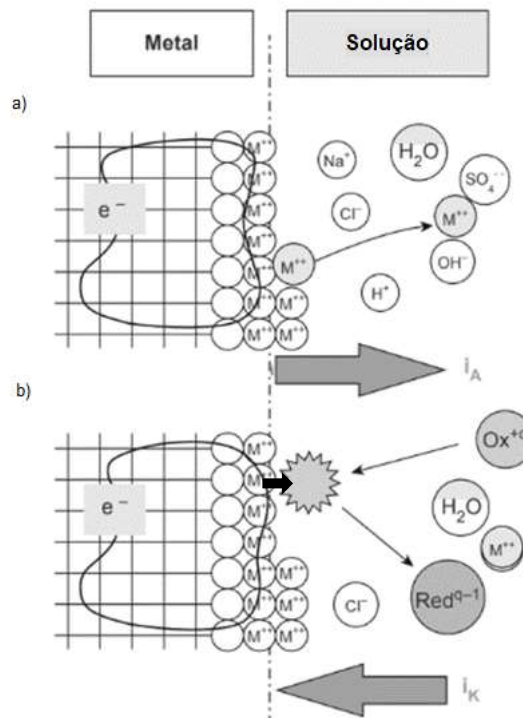
As técnicas eletroquímicas fornecem dados rápidos sobre as cinéticas das reações de corrosão em um material, com a possibilidade de fornecer dados instantâneos sobre a taxa de corrosão em determinados meios. As técnicas eletroquímicas de polarização são classificadas como destrutivas quando o material sofre alterações em composição ou massa e não destrutivas quando há a possibilidade de replicabilidade em uma mesma amostra sem alterar suas propriedades. (SILVERMAN, 2011; ALANO, 2014).

Os ensaios eletroquímicos são utilizados com a finalidade de verificar a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis e possuem curto tempo para geração de resultados. É uma técnica que tem como objetivo apoiar o meio produtivo na rápida obtenção de taxas de corrosão de metais em meios específicos e para avaliar a eficiência de inibidores de corrosão. A corrosão é ocasionada pela reação eletroquímica entre o meio aquoso e o metal (WOLYNEC,2013).

Podem ocorrer algumas reações básicas entre material e o meio aquoso, durante um processo corrosivo, com fluxo de elétrons para determinadas regiões. Esta corrente elétrica se dará entre os polos ânodo e cátodo. (RIBEIRO 2014).

A Figura 5 (a) mostra a formação do íon de M^{n+} que se direciona para a solução, resultando no fluxo da corrente do metal para a solução, sendo a corrente anódica i_a . Na Figura 5 (b) ocorre a redução das moléculas da solução e estas retiram os elétrons do metal, formando a corrente catódica i_k que é uma corrente da solução para o metal (VARGEL, 2020).

Figura 5 – Reações eletroquímicas entre meio e metal.



(a) Reação anódica, (b) Reação catódica.

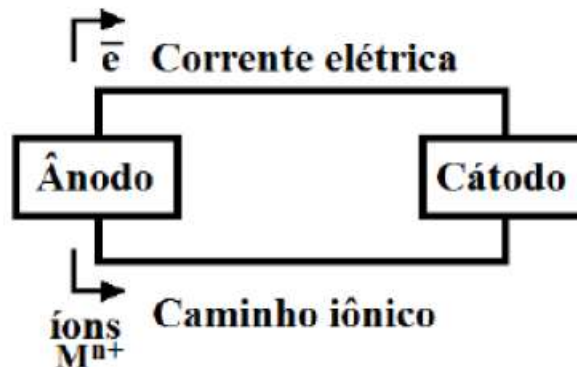
Fonte: VARGEL, 2020 (Adaptado).

A formação da corrente é subdividido em três etapas em sequência: etapa anódica, quando os íons passam do material para a solução; a transferência dos elétrons das regiões anódicas para as catódicas pelo circuito metálico com uma difusão de ânions e cátions na

solução. Na terceira etapa, chamada de catódica, os elétrons se ligam aos íons da solução, o que promove uma perda da massa do metal em consequência da perda de íons para o meio, caracterizando os processos corrosivos em geral (GENTIL,2008).

A Figura 6 indica o sentido da corrente elétrica e o caminho iônico em uma reação eletroquímica.

Figura 6 – Caminho iônico e corrente elétrica.



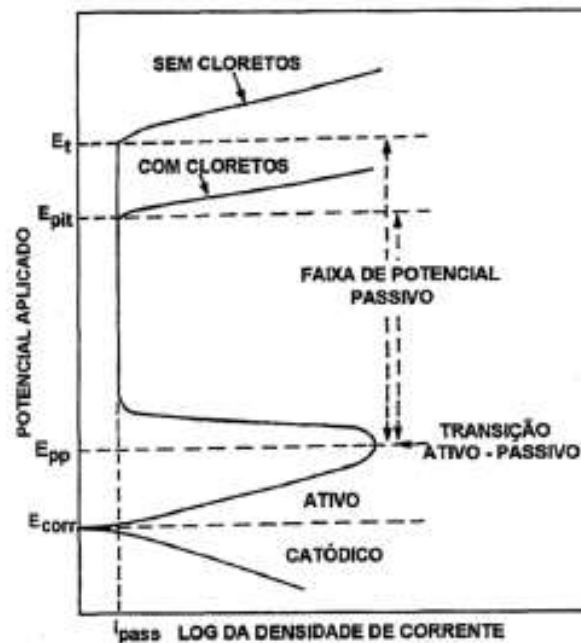
Fonte: RIBEIRO, 2014.

3.4.2 Curvas de polarização potenciodinâmica

Obtém-se as curvas de polarização a partir da polarização potenciodinâmica, onde a varredura do potencial pode ser acima do potencial de corrosão (potencial de circuito aberto) ou em potenciais abaixo do potencial de corrosão, onde predominam reações catódicas. Para um ensaio eletroquímico deve-se considerar alguns fatores que influenciam os resultados, são eles: temperatura, composição do soluto, velocidade de varredura e tempo de imersão anterior à varredura de potencial. As curvas de polarização potenciodinâmica fornecem as seguintes informações: potencial de corrosão, potencial de passivação, densidade de corrente de corrosão, dentre outras (WOLYNEC,2013).

Uma curva hipotética de polarização potenciodinâmica é representada na Figura 7:

Figura 7 – Curva de polarização potenciodinâmica.



Fonte: SEDRIKS, 1996.

Ao atingir valores acima do potencial de corrosão, até o potencial chamado de potencial de passivação (E_{pp}), a densidade da corrente aumenta até atingir um valor crítico, chamado de densidade de corrente de transição ativa-passiva (I_c). Na região ativa-passiva há dissolução ativa do metal, caracterizada pela adsorção ativa do oxigênio presente na solução. No intervalo de potencial e de densidade de corrente ocorre a formação de uma película (ou filme) de óxido ou hidróxido (SZKLARSKA-SMIALOWSKA, 1986).

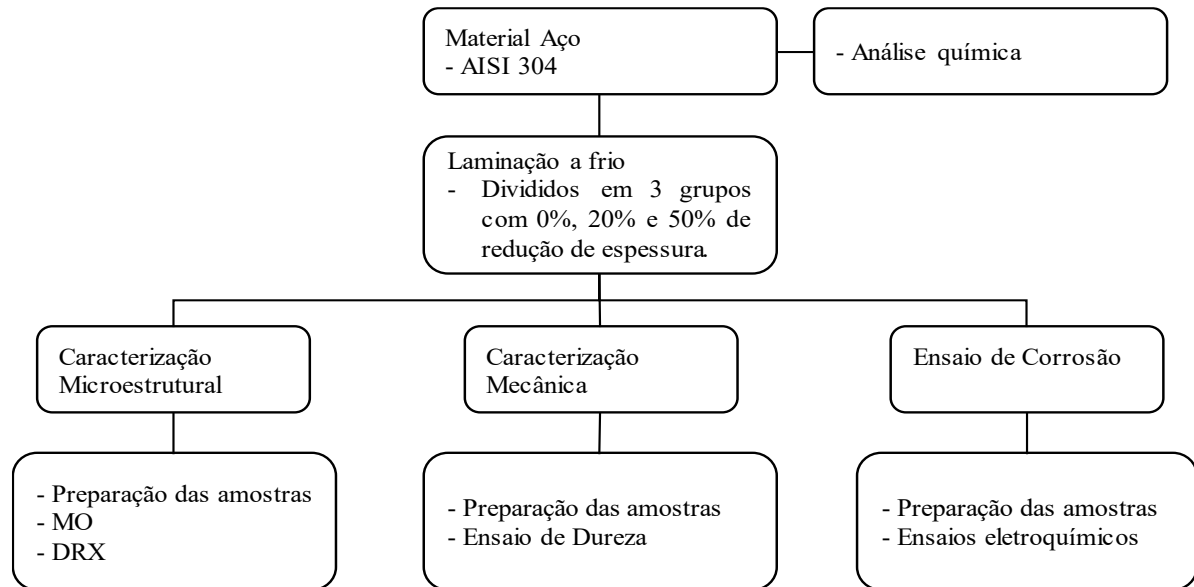
Acima do E_{pp} observa-se que a densidade de corrente tem uma brusca diminuição. Nesse ponto, a corrente é chamada de densidade de corrente passiva que permanece constante até o potencial de ruptura (E_{pit}). Nessa faixa de potencial, conhecida como faixa de potencial passivo, o filme permanece intacto. No entanto se o potencial for continuamente aumentado acima dessa faixa de potencial de passivação, a densidade de corrente voltará a aumentar acentuadamente, evidenciando a quebra do filme passivo. Aços inoxidáveis têm maiores chances de sofrerem corrosão por pites em ambientes ricos em cloretos (SZKLARSKA-SMIALOWSKA, 1986; SEDRIKS 1979).

A partir das curvas de polarização pode-se determinar os dados necessários para a obtenção da corrente e potencial de corrosão que serão utilizados para a equação de Tafel (PANOSSIAN, 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O Fluxograma com o resumo da metodologia é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma do processo experimental.



Fonte: Próprio Autor.

4.1 Materiais

O material utilizado neste trabalho consistiu de chapas laminadas a quente e recozidas para alívio de tensão do aço inoxidável austenítico AISI 304 com espessura inicial de 3 mm. As amostras de referências foram consideradas aquelas que não experimentaram a laminação a frio em laboratório.

4.2 Metodos

4.2.1 Laminação a frio para obtenção de diferentes reduções de espessura

Os aços inoxidáveis AISI 304 foram submetido a deformações adicionais por laminação a frio, para diferentes deformações. Os grupos foram montados com redução de espessura de 0%, 20% e 50%. Após as reduções os corpos de prova não foram submetidos à recozimento

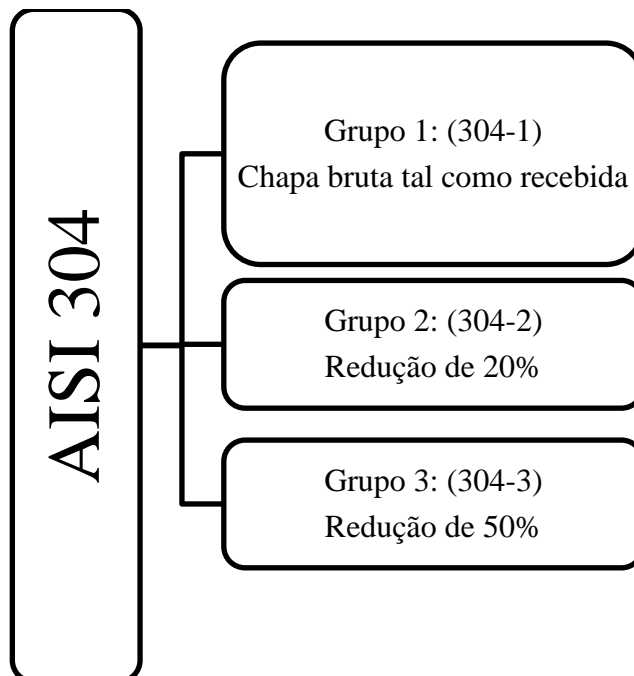
para alívio de tensão ou outro tipo de tratamento térmico. O objetivo foi simular as deformações das chapas nas operações de estampagem.

- Grupo 1: chapa no estado comercial com espessura de 3 mm, considerada a referência;
- Grupo 2: chapa com redução de espessura de 20% (espessura final de 2,4 mm);
- Grupo 3: chapa com redução de espessura de 50% (espessura final de 1,5 mm).

Os passes foram realizados com redução de espessura de 10% (0,3mm) a cada passe.

É mostrado na Figura 9 mostra um fluxograma do processo de laminação e separação dos grupos.

Figura 9 – Fluxograma de Laminação a frio AISI 304.



Fonte: Próprio autor

4.2.2 Análise química

A análise química foi realizada na chapa tal como recebida para o aço inoxidável austenítico AISI 304. Para a análise foram utilizados diferentes equipamentos distintos a fim de aumentar a precisão dos resultados e identificação de elementos químicos distintos. Os equipamentos utilizados para cada elemento foram:

- Os elementos carbono (C) e enxofre (S) foram analisados pela técnica de absorção de infravermelho no equipamento do fabricante Leco, modelo CS4440;

- O nitrogênio (N) foi analisado pela técnica de termcondutividade no equipamento do fabricante Leco, modelo TC4360;
- Os demais elementos químicos foram analisados pela técnica de espectrometria de fluorescência de raios-x no equipamento do fabricante ThermoARL, modelo 9900 e via espectrometria de emissão óptica no equipamento do fabricante ThermoARL, modelo 4460.

4.2.3 Análise metalográfica

O corte das amostras foi realizado com área de face de 1cm^2 (10mm x10mm), utilizando a guilhotina Newton TN10.

A embutidora metalográfica PRE 30Mi Arotec foi utilizada para embutimento a quente das amostras com resina termofixa de cura a quente (baquelite).

As amostras embutidas foram lixadas manualmente com lixas de 120mesh, 240mesh, 320mesh, 400mesh e 600mesh, e polidas com pasta de diamante de granulometria de $9\mu\text{m}$ e $3\mu\text{m}$ para obtenção de uma superfície com acabamento espelhado.

Realizou-se o ataque químico para análise da microestrutura das amostras com o reativo Água Régia preparada em 3 volumes de ácido clorídrico concentrado (HCl 37% Synth) e 1 volume de ácido nítrico concentrado (HNO₃ 65% Synth). O ataque foi realizado em temperatura ambiente até a revelação da microestrutura. Após, lavou-se as amostras em água corrente para neutralização do reagente, em seguida foram lavadas com álcool etílico e secas ao ar quente.

Utilizou-se de um microscópio óptico Kontrol modelo LM-713 com a ampliação de 400x para análise das microestruturas e capturou-se as imagens com uma câmera digital MDCE-AS já acoplada ao microscópio e com software próprio para tratamento das imagens.

4.2.4 Ensaio de Difração de Raios X

Para a difração de raios X as amostras foram preparadas com a área 1cm^2 . Utilizou-se uma solução de ácido clorídrico (HCl) para a decapagem química por 10 minutos em imersão. O ataque teve a finalidade de retirar a camada passiva da amostra para a realização do ensaio. Em seguida, as amostras foram lavadas com água corrente e álcool etílico, e secas com jato de ar quente, sendo em seguida identificadas e encaminhadas para análise.

Utilizou-se um difratômetro modelo Shimadzu XRD-7000 para a realização do ensaio com ângulo de varredura nos valores de $40^\circ < 2\theta < 100^\circ$, a velocidade de $2,0^\circ/\text{min}$, operando a 40kV e 30mA . A fonte de radiação utilizada foi o $\text{CuK}\alpha$.

Houve a análise dos picos da fase austenita γ e da fase martensita α' induzida pela deformação e os valores são dados em termos das estimativas quantitativas volumétricas V_γ e $V_{\alpha'}$, utilizando-se das equações (1) e (2) para estabelecer as frações volumétricas das respectivas fases:

$$V_i = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_i^j}{R_i^j}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_\gamma^j}{R_\gamma^j} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_{\alpha'}^j}{R_{\alpha'}^j}} \quad (1)$$

$$V_{\alpha'} + V_\gamma = 1 \quad (2)$$

onde I = intensidade integrada de pico, $i = \gamma$ ou α' , n = número de picos examinados e R = a intensidade teórica calculada para o plano (hkl) da fase i . As equações 1 e 2 permitem o cálculo simultâneo, a partir da difração de raios X, da fração volumétrica de austenita γ e martensita α' presentes no aço inoxidável austenítico, medindo a intensidade integrada de cada pico (DE, 2004; XU, 2012; CULLITY, 1978)

4.2.5 Dureza

Utilizando-se de um microdurômetro Shimadzu modelo HMV- 2T obteve-se os dados de dureza das amostras. Em postos distintos foram realizadas 10 medições de dureza Vickers para cada amostra, com carga de 500 gramas força. As médias e o desvio padrão dos grupos foram calculados. As amostras de dureza foram preparadas da mesma forma que para a análise metalográfica.

4.2.6 Resistência à corrosão

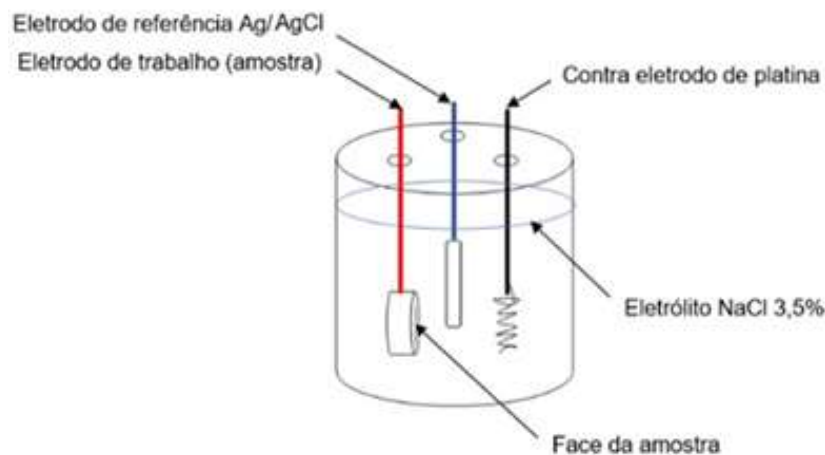
Montou-se os corpos de prova com as medidas de 10mm de comprimento por 10mm de largura para cada grupo de amostra (1cm^2). Os corpos de prova foram embutidos com resina

termofixa de cura a frio. Posicionou-se os fios de cobre, para contato elétrico e análise da área de interesse, durante o processo de embutimento.

Para o contato foi utilizado fio rígido de 4mm, este fio foi posicionado no lado oposto a face exposta de cada amostra. Após o embutimento, os corpos de prova foram lixados com lixa de 120mesh, 240mesh, 320mesh, 400mesh e 600mesh. Realizou-se o polimento posterior das amostras com pasta de 9μ e 3μ . Após o lixamento lavou-se as amostras com água destilada e secou com álcool etílico absoluto e jato de ar quente.

Para os ensaios de corrosão utilizou-se o potenciostato Vertex 100mA. EIS – 1MHz, com o eletrodo de referência RE-1B prata – cloreto de prata (Ag/AgCl), para meios aquosos, com 80mm de comprimento e 6mm de largura e junção de vidro, e um contra eletrodo de platina espiralado com 23mm de comprimento e 0,5mm de espessura. O meio eletrolítico utilizado foi de uma solução de NaCl 3,5% em massa. A montagem da célula de corrosão está demonstrada na Figura 10, tendo a cautela de, durante todo o ensaio, deixar a face do eletrodo de trabalho de frente para o contra eletrodo de platina e posicionado na vertical para evitar o aprisionamento de bolhas.

Figura 10 – Esquema de montagem da célula eletroquímica.



Fonte: Próprio autor.

As amostras embutidas estiveram imersas na solução 3,5% do cloreto de sódio, naturalmente aerada, iniciando a polarização após a estabilização do potencial de circuito aberto (OCP). Para confirmação da estabilização do OCP obedeceu-se aos seguintes critérios: o potencial será monitorado durante 60min estabilização da camada passiva para sua estabilização, se dentro deste período a sua variação não ultrapassasse a faixa de 10mV a

estabilização do OCP teria ocorrido. O tempo de estabilização foi definido de, no mínimo, 3600s, de forma que a polarização só seria iniciada após decorrido esse tempo.

O ensaio de polarização potenciodinâmica iniciou-se a 250mV abaixo do potencial de circuito aberto (ou de corrosão), realizando-se varredura contínua e ascendente do potencial, com uma velocidade de varredura de 0,16mV/s até o potencial de 1,2V. Após o término do ensaio as amostras foram lavadas com água corrente e secas com álcool etílico absoluto e jato de ar quente para posterior observação em microscópio óptico. Utilizou-se 3 réplicas para cada condição estudada, a temperatura no ambiente do ensaio foi mantida em $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Foram obtidos os parâmetros de potencial de corrosão (E_{corr}), corrente de corrosão (I_{corr}), potencial de pite (E_{pite}) e as constantes Tafel anódica (β_a) e constante de Tafel catódica (β_c).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise química

Através de análise química foram obtidos os valores da composição química do aço inoxidável AISI 304. Os dados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química após análise da amostra do aço AISI 304.

Elemento Químico	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Outros elementos
Teor (%)						17,50	8,00		
(ABNT NBR 5601)	<0,08	<2,00	<0,045	<0,30	1,00	a	a	<0,10	-
Amostra	0,02	1,28	0,04	0,001	0,40	18,00	8,00	0,04	-

Fonte: Próprio Autor.

Os resultados obtidos pelos ensaios atendem aos valores estabelecidos pela Norma ABNT NBR 5601: 2011 que é utilizada para a classificação dos aços inoxidáveis.

5.2 Análise metalográfica AISI 304

Através das análises metalográficas no microscópio óptico obteve-se imagens da microestrutura do aço AISI 304, laminado a frio, para os níveis de redução de espessura de 0%, 20 e 50%.

Ao analisar a amostra como recebida de 0% percebe-se a estrutura típica de austenita com contornos de grão bem definidos e algumas maclas, como mostradas na Figura 11 (HÁ, 2021; CHIAVERINI, 2008).

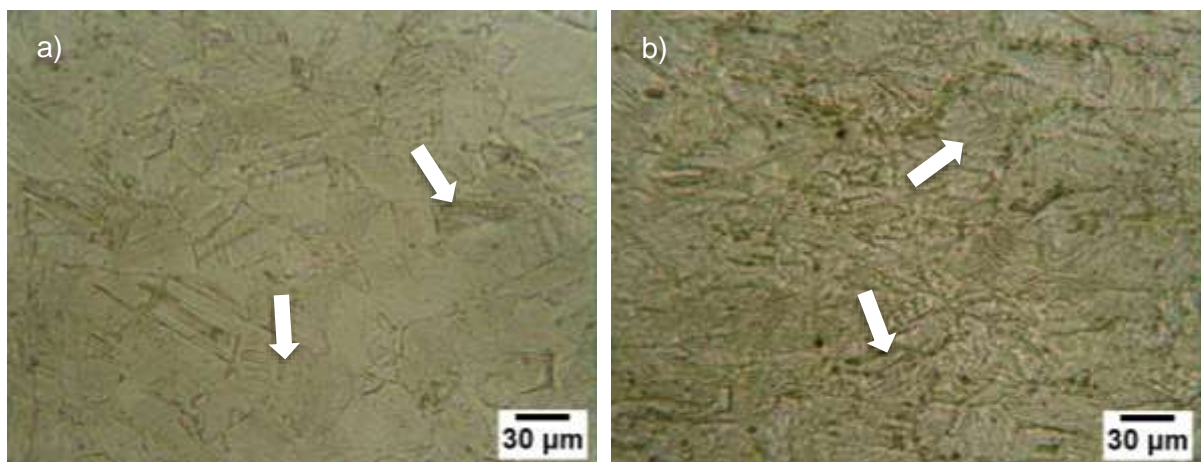
Figura 11 – Micrografia aço AISI 304 da amostra 0% como recebido.



Fonte: Próprio Autor.

Observando a Figura 12 (a) percebe-se o alongamento dos grãos como efeito da laminação sofrida, nas amostras de 20% de redução de espessura com a formação da estrutura acicular da formação de martensita que se deu pelo processo de laminação, indicada pelas setas. Nas amostras de 50% de redução de espessura foi percebido que com o aumento da redução de espessura a morfologia do grão tornou-se de difícil visualização e notou-se um aumento nas formas aciculares que indicam a presença de martensita na amostra, como indicadas pelas setas na Figura 12 (b) (HE, 2018) (DE, 2004) (SADEGHI, 2021).

Figura 12 – Micrografia aço AISI 304.



a) 20% de redução de espessura; b) 50% de redução de espessura

Fonte: Próprio Autor.

Para que ocorra a transformação martensítica devem ser considerados a temperatura do material, a composição química do aço, sua tensão residual e a deformação que será aplicada sobre o mesmo. Ao observar as micrografias notou-se que houve a formação de martensita que teve sua origem na deformação do material, uma vez que a deformação foi realizada a frio. A martensita formada pode ser martensita- ϵ , com estrutura cristalina hexagonal compacta (HC), e martensita- α' , de estrutura cúbica de corpo centrada ou tetragonal de corpo centrado (CCC/TCC) (CHAVES, 2019; TALONEN, 2007)

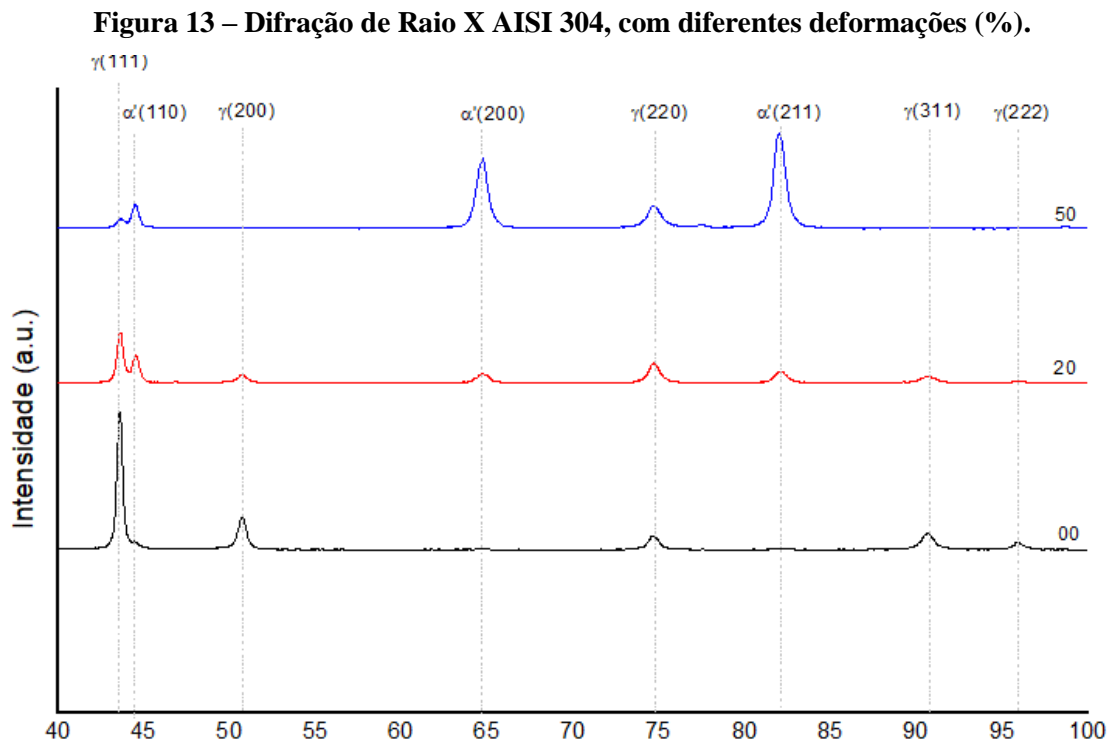
Notou-se que com o aumento da redução de espessura, com maior visualização nas amostras de 50% de redução de espessura, aumenta-se a percepção de martensita e sua morfologia torna-se mais difusa e dispersa (HE, 2018).

Ao analisar as imagens não foram encontrados precipitados ou outras estruturas nas amostras analisadas. Percebeu-se também que ao elevar a quantidade de deformação plástica durante a laminação a frio, ocorreu a alteração na morfologia do grão com um alongamento em sua forma até a perda do seu contorno, não podendo ser estimado este aumento através das

imagens. Essa variação morfológica pode estar associada a mudanças na textura cristalográfica (TANHAI, 2018).

5.3 Difração de Raios X do aço AISI 304

A Figura 13 mostra o difratograma das amostras do aço AISI 304. A amostra com redução de 0% mostrou, como esperado, a ocorrência de austenita.



Fonte: Próprio Autor.

Pode-se observar na Figura 13 os picos de difração para a martensita- α' (CCC) e austenita- γ (CFC). Os planos de reflexão identificados nestas amostras foram γ -(111), γ -(200), γ -(220), γ -(311), γ -(222) em 2θ de 43,6°, 50,9°, 74,8°, 90°, 96,0°, respectivamente, α' -(110), α' -(200), α' -(211) em 2θ de 44,6°, 65,0°, 82,1° respectivamente. (DE, 2004) (LEBEDEV, 2016) (LI, 2022)

A fase austenítica indicada nos planos (111), (200) e (311) reduz à medida que se aumenta a redução de espessura, como observado na amostra de 20% de redução de espessura, e torna-se quase imperceptível nas amostras com 50% de redução de espessura. Observa-se, no entanto, o comportamento oposto da fase martensítica, nos planos (110), (200) e (211), que era desprezível na amostra como recebida e aumentou sua intensidade com o aumento das taxas de deformação (SOLOMON, 2017).

Ao relacionar os dados de difração mostrados na Figura 13 nota-se que na amostra do aço como recebido com as amostras com redução de espessura, verifica-se que os picos de austenita estão diminuindo com sua fração volumétrica reduzindo de 1,00 para 0,18 comparando 0 e 50%, respectivamente. Ao reduzir a espessura tem-se o aumento da fração volumétrica da martensita de 0,00 para 0,82, demonstrando que o seu surgimento foi devido a deformação a frio pela transformação da austenita (γ) em martensita α' (AMAR K., MURDOCK D., MATAYA M., 2004; SANTOS, T.F.A.; ANDRADE, M.S., 2008; BORGES, F. C. N.; OLIVEIRA, W. R., 2015).

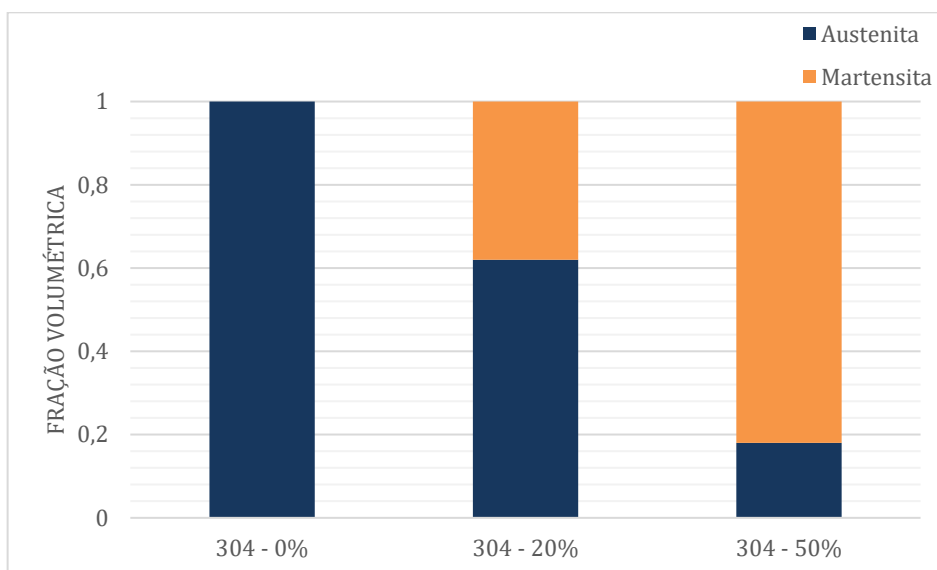
A Tabela 4 mostra a fração volumétrica de austenita e martensita presentes nas amostras do aço AISI 304 de 0, 20 e 50% de redução de espessura. A Figura 14 demonstra a proporção em relação ao material da fração volumétrica.

Tabela 4 – Estimativa fração volumétrica das fases do AISI 304 com diferentes reduções de espessura (%).

Amostra	304 - 0%	304 - 20%	304 - 50%
Austenita	1,00	0,62	0,18
Martensita	0,00	0,38	0,82

Fonte: Próprio Autor.

Figura 14 – Estimativa fração volumétrica proporcional das fases do AISI 304 para as reduções de espessura (%).



Fonte: Próprio Autor.

5.4 Dureza Vickers AISI 304

Realizou-se a o ensaio de microdureza Vickers do aço AISI 304 na amostra como recebida e nas amostras laminadas a frio com redução de 20 e 50% na espessura. A média dos valores obtidos e o desvio padrão calculado são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado da microdureza Vickers no aço AISI 304 com diferentes reduções de espessura (%)

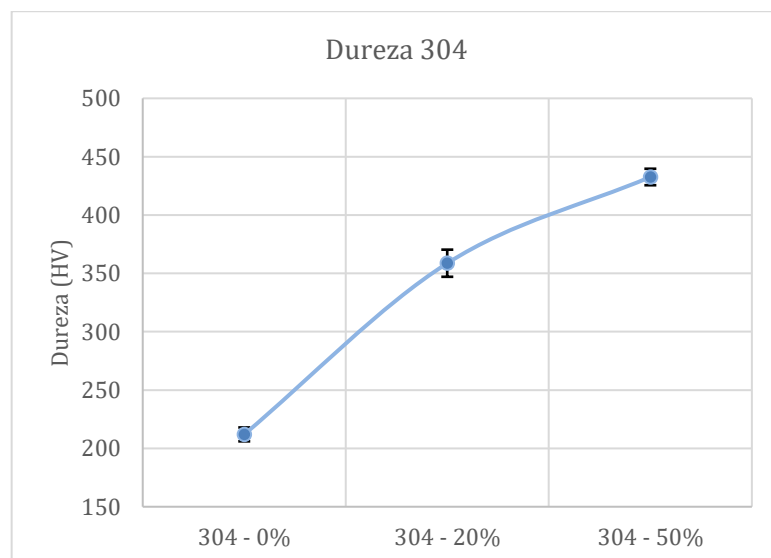
Amostra	304 - 0%	304 - 20%	304 - 50%
Microdureza (HV)	212 ± 6	359 ± 12	433 ± 7

Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar os valores obtidos, nota-se um aumento dos valores de dureza ao aumentar a redução de espessura, saindo de 212HV (amostra como recebida) para 433HV (50% de redução de espessura). Este aumento de dureza pode ser influenciado pelo aumento gradual do encruamento associado à provável formação de martensita α' (LICHTENFELD, J. A., VAN TYNE, C. J., 2006; SANTOS, T.F.A.; ANDRADE, M.S., 2008; TANHAI S., GHEISARI K., 2018; MARQUES, A.V. M.; DO CARMO, K. M., 2020).

A Figura 15, apresenta os valores de dureza Vickers para as amostras do aço AISI 304 com 0, 20 e 50% de redução de espessura.

Figura 15 – Microdureza Vickers do aço AISI 304 com diferentes reduções de espessura (%).



Fonte: Próprio Autor.

5.5 Ensaio de Corrosão

As amostras foram montadas para o ensaio de acordo com o esquema apresentado. A Figura 16 mostra a montagem da célula eletroquímica em laboratório.

Figura 16 – Montagem da célula eletroquímica em laboratório.



Fonte: Próprio Autor.

As curvas de OCP apresentaram estabilidade e comportamentos semelhantes em todas as amostras observadas. Indicando a formação da camada passiva sobre as superfícies. Foram observados valores de potenciais entre $-0,10(\text{VxAg/AgCl})$ e $-0,15(\text{VxAg/AgCl})$ após a estabilização.

O ensaio de polarização potenciodinâmica do aço inoxidável austenítico foi realizado para o material tal como recebido e com a redução de espessura de 20%, e 50%. Realizaram-se 3 réplicas para cada grupo de amostras do aço AISI 304, a média dos resultados são mostrados na Tabela 6, onde: E_{corr} : potencial de corrosão; I_{corr} : corrente de corrosão; E_{pite} : potencial de pite, β_a : constante de Tafel anódica; β_c : constante de Tafel catódica.

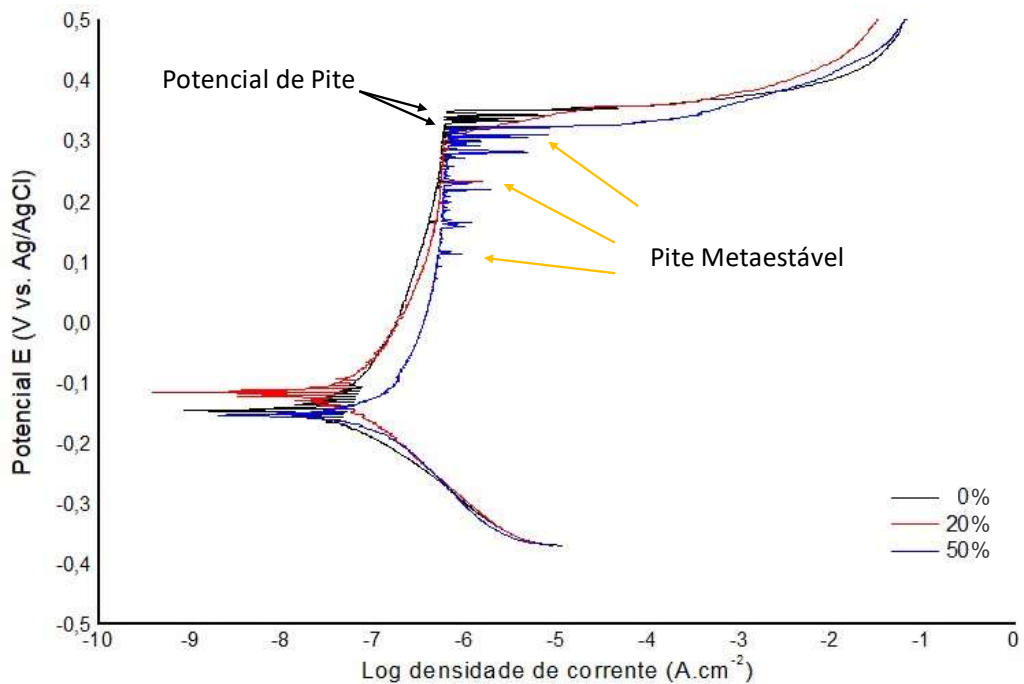
Tabela 6 – Resultado da polarização potenciodinâmica do AISI 304 com as reduções de espessura de 0, 20 e 50%.

Amostra	304 - 0%	304 - 20%	304 - 50%
E_{corr} (V x Ag/AgCl)	$-0,14 \pm 0,03$	$-0,14 \pm 0,01$	$-0,15 \pm 0,03$
I_{corr} ($\mu\text{A}, \text{cm}^{-2}$)	$0,05 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,01$
$E_{píte}$ (V x Ag/AgCl)	$0,32 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,05$	$0,36 \pm 0,06$
β_a (V, dec^{-1})	$0,17 \pm 0,06$	$0,15 \pm 0,05$	$0,25 \pm 0,09$
β_c (V, dec^{-1})	$0,10 \pm 0,09$	$0,10 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,02$
Taxa de corrosão ($\mu\text{m}/\text{ano}$)	$0,55 \pm 0,09$	$0,40 \pm 0,08$	$0,50 \pm 0,09$

Fonte: Próprio Autor.

No ensaio de polarização foi obtida a curvas típica para o aço AISI 304 para a amostra de 0% como recebida e obteve-se as curvas para as amostras com as reduções de espessura de 20% e 50%, como mostra a Figura 17. Houve a indicação da fase catódica com a decomposição do oxigênio e água para a formação de hidroxila e hidrogênio e a fase anódica onde há a dissolução das amostras (PRADHAN, 2019) (HÁ, 2021) (MA, 2020) (GUAN, 2015) (VASUDEVAN,2021).

Figura 17 – Curvas de polarização potenciodinâmica de todas as amostras de AISI 304



Fonte: Próprio Autor.

Observou-se que a fase anódica inicia sua formação com uma inclinação maior que a fase catódica, o que indica a passivação após o potencial de corrosão.

A partir do potencial de 0,10V são observados pites metaestáveis, que são indicados por picos de correntes ou instabilidades na região da faixa de potencial passivo, foram indicados pelas setas alaranjadas, observando que houve maior frequência na amostra com 50% de redução de espessura (PRADHAN, 2019) (CARVALHO, 2022) (HÁ, 2021) (IZQUIERDO, 2014)

O potencial no qual um aumento contínuo e rápido na corrente começa, após o pite metaestável, foi considerado a região de pite estável e definido como potencial crítico de pitting (SALEHI, 2022) (PRADHAN, 2019). Os valores de E_{pite} são semelhantes aos encontrados em estudos do aço inoxidável AISI 304 (PRADHAN, 2019). Além disso, foram encontrados maiores valores de β_a do que β_c que podem estar relacionados com a aceleração do processo de passivação (KASHANI, 2021).

Notou-se um deslocamento na região ativa da amostra com 50% de redução de espessura, o que pode indicar uma diminuição na sua resistência à corrosão. Porém, ao analisar somente os valores apresentados na Tabela 6 é possível perceber semelhanças nos três grupos amostrais, indicando que os parâmetros típicos de avaliação da resistência à corrosão não evidenciam a redução da resistência à corrosão causada pela transformação da microestrutura assim como evidenciado pelo perfil da curva de polarização na região ativa.

6 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos para as amostras aço inoxidável AISI 304, laminado a frio, com reduções de espessura de 0%, 20% e 50% sem tratamentos térmicos posteriores foi possível estudar as propriedades corrosivas e alterações em sua microestrutura.

A análise química garantiu que a composição do material fosse condizente com a Norma ABNT NBR 5601: 2011.

Ao analisar a microestrutura das amostras do aço AISI 304 em microscopia óptica foi possível observar os efeitos da redução de espessura nos grãos e a alteração nos constituintes presentes. Observou-se visualmente maior quantidade de martensita ao aumentar a quantidade de redução de espessura. Foi possível visualizar o alongamento dos grãos no sentido da deformação realizada, caracterizando o encruamento do material após a sua conformação. Percebeu-se que não houve a formação de imperfeições.

A difração de raios X mostrou que a amostra de 0% era composta por austenita e que esta transformou-se em martensita à medida que se aumentava a quantidade de deformação plástica em laminação a frio. Com um valor de fração volumétrica de 82% de martensita para a amostra com 50% de redução adicional.

Os ensaios de microdureza Vickers mostraram os efeitos da formação de martensita nos aços inoxidáveis austeníticos. Esta martensita elevou os valores de dureza Vickers do aço AISI 304, principalmente na amostra com redução de 50% em sua espessura, onde o valor foi, aproximadamente o dobro em relação à amostra de 0%

Durante os ensaios de corrosão foi observado que a camada passiva do material não foi prejudicada e o aço AISI 304 manteve sua alta resistência à corrosão. Notou-se que ocorreu maior aparecimento de pites metaestáveis nas amostras com 50% de redução de espessura, um efeito negativo da laminação a frio do material. Observou-se ainda que não houve variações significativas nos valores dos resultados dos três grupos amostrais, ao obter a curva de Tafel, indicando que não houve diferenças na resistência à corrosão do aço AISI 304.

Como sugestão de pesquisa pode-se analisar a relação entre a corrente de pite e o crescimento da mesma nas amostras e verificar a relação entre a deformação e o aumento de pites metaestáveis.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5601: aços inoxidáveis: classificação por composição química.** Rio de Janeiro: ABNT; 2011.

ABAL. **Alumínio: processos de produção.** Disponível em: <<https://abal.org.br/wp-content/uploads/2017/03/laminacao-01.jpg>>, acessado em 19 de janeiro de 2022.

AÇO MARANHÃO. **O monumento mais alto em aço inoxidável no mundo.** Disponível em: <<http://acomaranhao.grupodimensao.com/pt-br/o-monumento-mais-alto-em-aco-inoxidavel-no-mundo/>>, acessado em 19 de janeiro de 2022.

ALANO, J. H. **Efeito da precipitação de fase secundária na resistência à corrosão da superliga UNS N26455 / José Henrique Alano.** São Carlos. UFSCar, 2014.128p.

APERAM. **Aço inoxidável: a solução perfeita para o desenvolvimento sustentável.** Disponível em: <<http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2015/05/Aco-Inoxidavel-Asolucao-perfeita-para-o-desenvolvimento-sustentavel.pdf>>. Acesso em: 10 março 2021.

ASTM G46-94 (2005), **Guia padrão para exame e avaliação de corrosão por pite**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

CAMPBELL, R. D. **Avoiding defects of stainless steels welds.** Welding Journal, 86, 2007, 53-63p.

CARBÓ, H.M. **Aços inoxidáveis- aplicações e especificação.** São Paulo: Núcleo Inox, 2001.

CARVALHO, Ricardo N.; TROCONIS, Brendy C.; PIOSZAK, Greger; YNCIARTE, Vinicio; SCULLY, Jonh R.. **Effect of microstructure on the pitting susceptibility of a Martensitic ferritic stainless steel: A corrosion-metallurgical study.** Corrosion Science. 2022, Vol. 202, p. 110277

CHAVES, Jéssica Gadêlha; FONSECA, Gláucio Soares, LOPES, Luiz Carlos Rolim. **Análise da martensita induzida por deformação de um aço inoxidável austenítico 304l com**

concentradores de tensão submetido a fadiga de baixo ciclo. Tecnologia Em Metalurgia, Materiais E Mineração 16.4 (2019): 470.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos.** 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2008. 599 p.

CORASSINI, E. **Influência do grau de encruamento e tratamentos térmicos de recozimento nas propriedades mecânicas do aço ABNT 1006.** 2012. 75f. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Industrial, São Bernardo do Campo, 2012.

CORRÊA, E. C. S. **Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio.** 2004. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2004.

CORRÊA, E. C. S., AGUILAR, M. T. P. and Cetlin, P. R. **The influence of cyclic straining on the work hardening behavior of AISI 304 stainless steel bars in multiple-pass drawing.** Materials Chemistry and Physics. 2007, Vol. 106, pp. 95-101.

CULLITY, B. D. **Elements of x-ray diffraction.** 2^a ed. Phillipines: Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1978. 555 p.

DE, Amar K.; MURDOCK, David C.; MATAYA, Martin C.; SPEER, John G.; MATLOCK, David K.. **Quantitative measurement of deformation-induced martensite in 304 stainless steel by X-ray diffraction.** Scripta Materialia. 2004, Vol. 50, pp. 1445-1449.

DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica.** 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p.

FERREIRA FILHO, A.; LIMA, L.M.F.G.; PADILHA, A.F.; LIMA, N.B.. **Controle da microestrutura e da textura de chapas de aço baixo carbono para estampagem.** In: TSCHIPTSCHIN, A. P. et al. Textura e relações de orientação. Deformação plástica, recristalização e crescimento de grão. São Paulo: EPUSP, 2001. p. 189-203.

FONSECA, Camila S.; SILVA, Ivete Peixoto P.; BRANT, Gabriella Soares C.. **Influência do aporte térmico sobre a microestrutura em juntas soldadas de aço inoxidável AISI 304.** Engevista. v. 19, n. 1, p. 1-8, 2017.

GUAN, L., . ZHANG, B. YONG, X. P.WANG, J. Q. HAN, E. H.; KE, W.. **Effects of cyclic stress on the metastable pitting characteristic for 304 stainless steel under potentiostatic polarization.** Corrosion Science. 2015, Vol. 93, pp. 80-89.

HA, H.-Y.; JANG, Jae Hoon; LEE, T.; KIM, Sung-Dae; LEE, C.-H.; MOON, Joonoh. **Enhancement of the resistance to localized corrosion of type 304 borated stainless steels through hot rolling.** Corrosion Science. 2021, Vol. 192, p. 109798.

HE, S. L., Liu, Y. and Jiang, D. M. **Effect of martensite transformation on Chemical composition, semiconductor property and corrosion resistance of passive film on SAE 304stainless steel.** Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2018, Vol. 49, pp. 1455–1467.

IZQUIERDO, J.; RUIZ, L. M.; PEREZ, B.M.; RAPOSO, R. R.; SANTANA, J. J.; SOUTO, R. M.. **Scanning microelectrochemical characterization of the effect of polarization on the localized corrosion of 304 stainless steel in chloride solution.** Journal of Electroanalytical Chemistry. 2014, Vol. 728, pp. 148-157.

KASHANI, F. R; KASHANI, F. R.. **Electrochemical studies and molecular simulations on the use of molybdic acid for stabilization of AISI 304 stainless steel passive film in sulfuric acid medium.** Journal of Molecular Liquids. 2021, Vol. 344, p. 117733.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance.** Ohio: Asm International, 2005. 613 p.

LEBEDEV, A.A. and Kosarchuk, V.V. **Influence of phase transformations on the mechanical properties of austenitic stainless steels.** International Journal of Plasticity. 2016, Vol. 16, pp. 749-

LI, J.; PEI, W.; ZHAO, M.; ZHAO, D.; SHI, X.. **Study of Cold Rolling on the Transformation Mechanism Microstructure, and Properties of 304 Austenitic Stainless Steel.** Steel Research International. 2022, Vol. 93, p.2100341

MA, G.; WU, G.; SHI, Wei; XIANG, S.; CHEN, Q.; MAO, X.. **Effect of cold rolling on the corrosion behavior of Ta-4W alloy in sulphuric acid.** Corrosion Science. 2020, Vol. 176, p. 108924.

MATHEUS, Cap. José Ricardo Gomes. **Evolução microestrutural dos aços inoxidáveis ferríticos AISI 409 e AISI 430E durante o processamento em um laminador steckel.** 2006. 247 folhas. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – RJ, 2006.

MARQUES, A.V. M.; DO CARMO, K. M.; LAGE, W. C., et al. Revista Matéria, v.25, n.2, 2020.

MESQUITA, E. L. A.; RUGANI, L. L. **Estampagem dos aços inoxidáveis.** São Paulo: 1997. 51 p

MORO, Norberto, AURAS, A. P. **Processos de fabricação: Conformação mecânica I – Generalidades, Laminação e Forjamento.** Centro Federal De Educação Tecnológica De Santa Catarina. Florianópolis, 2007

OLIVEIRA, J. D. C. P. T. D. **Evolução da microestrutura e da textura durante a laminação a frio e a recristalização de alumínio com diferentes níveis de pureza.** Universidade de São Paulo 260 p. 2009.

ROSA, A. P. F. **Jóias em aço inoxidável: proposta para produção artesanal.** Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006. 96p

PANOSSIAN, Zehbour; SANTOS, Célia Aparecida Lino dos; et al.; **Interpretação de curvas de polarização.** Intercorr. Abraco. Fortaleza. 2014

PECKNER, D; BERNSTEIN, I.M. **Handbook of Stainless Steels.** United States os America: McGraw - Hill Book Company, 1977.

PRADHAN, S.K.; BHUYAN, P; **Influence of the individual microstructural features on pitting corrosion in type 304 austenitic stainless steel.** Corrosion Science. 2019, Vol. 158, p110277.

RIBEIRO, R. F. **Avaliação da resistência a corrosão de uma junta de aço inoxidável duplex UNS S31803 soldada por processo a fricção com pino consumível.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. p91.

SADEGHI, F.; ZARGAR, T.; KIM, J. W.; HEO, Y. U.; LEE, J. S.; YIM, C. H.. **Role of the annealing twin boundary on the athermal α' -martensite formation in a 304 austenitic stainless steel.** Materialia. 2021, Vol. 20, p. 101218.

SALEHI, M.; YEGANEH, M.; HEIDARI, R. B.; ESKANDARI, M.. **Comparison of the microstructure, corrosion resistance, and hardness of 321 and 310 s austenitic stainless steels after thermo-mechanical processing.** Materials Today Communications. 2022, Vol. 31, p. 103638.

SEDRIKS, A.J. **Corrosion of Stainless Steels.** New York, John Wiley & Sons Inc., 1996, 282p.

SILVA, A. L. V. C; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais.** 3. ed. rev. São Paulo: Blucher, 2010. 646 p.

SILVERMAN, D., **Practical corrosion prediction using electrochemical techniques.** In Uhlig's Corrosion Handbook, Third Edition, ECS: Pennington, NJ, 2011; pp 1129-1166.

SOLOMON, N. and Solomon, I. **Effect of deformation-induced phase transformation on AISI 316 stainless steel corrosion resistance.** Engineering Failure Analysis. 2017, Vol. 79, pp. 865-875.

SOUZA, A. D. N; ROSSI, C. G. F. T.; DANTAS, T. N. C.; SOUZA, M. A. F.; LIMA, D. F.; MENEZES, F. G.; MACIEL, M. A. M.. **Inibição à corrosão de aço-carbono em meio**

salino pelo heterociclo isatina veiculado em microemulsões. Quim. Nova, Vol. 40, No. 7, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. 760-768p.

SOUZA, L. M.; PEREIRA, E.C. **Influência da corrosão no aço inoxidável duplex S3803 submetido a íons de cloreto em diferentes temperaturas.** Perspectivas Online: Exatas & Engenharia, v.10, n.29, p.53-73, 2020.

SZKLARSKA-SMIALOWSKA Z. **Pitting Corrosion of Metals.** Nace International. Houston; 1986.

TALONEN, J. **Effect of strain-induced α' -martensite transformation on mechanical properties of metastable austenitic stainless steels** [dissertation]. Espoo: Helsinki University of Rechnology; 2007.

TANHAI S., GHEISARI K., ZAREE SR., **Effect of cold rolling on the microstructural, magnetic, mechanical, and corrosion properties of AISI 316L austenitic stainless steel.** International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. v.25, 2018.

TELLES, P.S., **Materiais Equipamentos de Processo**, 6 ed., Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2003.

VARGEL, C. **Corrosion of aluminium.** Elsevier Amsterdam, 2020.

VASUDEVAN, S. **Studies Relating To Cathodic Reactions In Neutral Chloride Solutions Used In Chlorate Processes.** Industrial & Engineering Chemistry Research. 2008, Vol. 47, pp. 5742-

XU, Y., ZHANG, S. H.; CHENG, M.; SONG, H.W.. **In situ X-ray diffraction study of martensitic transformation in austenitic stainless steel during cyclic tensile loading and unloading .** Scripta Materialia. 2012, Vol. 67, pp. 771-774, 2012.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em corrosão.** EDUSP, 2013.