



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

FRANCISCO MARCELLUS CARMO DO NASCIMENTO

**AS MICROESTRUTURAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS
INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS, FERRÍTICOS E MARTENSÍTICOS QUE
DEFINEM A UTILIZAÇÃO DE CADA UM: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

FORTALEZA

2022

FRANCISCO MARCELLUS CARMO DO NASCIMENTO

AS MICROESTRUTURAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS
INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS, FERRÍTICOS E MARTENSÍTICOS QUE DEFINEM A
UTILIZAÇÃO DE CADA UM: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N195m Nascimento, Francisco Marcellus Carmo do.
As microestruturas e propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos que definem a utilização de cada um: uma revisão de literatura. / Francisco Marcellus Carmo do Nascimento. – 2022.
64 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

1. Aços inoxidáveis. 2. Propriedades mecânicas. 3. Microestrutura. 4. Aplicações. I. Título.

CDD 669

FRANCISCO MARCELLUS CARMO DO NASCIMENTO

AS MICROESTRUTURAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS
INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS, FERRÍTICOS E MARTENSÍTICOS QUE DEFINEM A
UTILIZAÇÃO DE CADA UM: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Metalúrgica do
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Candido Jorge de Sousa Lobo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Rivalda e Jonas.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me proporcionado saúde e perseverança para superar os desafios por qual passei durante o curso.

Aos meus pais, Rivalda e Jonas, por sempre me apoiarem nas minhas escolhas, pelos seus ensinamentos que formaram a pessoa que sou e principalmente por terem proporcionado boas condições de vida e acesso à educação de qualidade. Hoje todas as conquistas e resultados positivos que obtive são em maioria por conta dos dois.

Ao Prof. Dr. Marcelo José por ter aceitado ser meu orientador e pela sugestão de tema em momento que eu estava bastante perdido quanto às ideias.

À coordenação do curso de engenharia metalúrgica e em especial ao Antônio, por estar sempre em prontidão a ajudar a mim e a todos os alunos do curso.

Ao centro acadêmico de engenharia metalúrgica e a empresa Júnior, Metal Soluções Júnior onde tive experiências que possibilitaram a minha formação pessoal e profissional, abrindo portas para outras oportunidades que surgiram mais adiante.

Ao laboratório de Pesquisa em Corrosão, em especial o Prof. Dr. Walney e a Roberta, por terem me dado a oportunidade de ser bolsista no laboratório em uma área do curso que me identifico bastante, bem como os aprendizados que contribuíram para minha formação técnica.

Ao Lucas por toda a paciência, disposição e boa vontade em me ajudar e apoiar nesses últimos meses.

Aos meus amigos de curso Ítalo Maciel, Maykel Sampaio, Rayane Mendes e Rinaldo Carvalho, com os quais eu pude compartilhar boas risadas, aprendizados e apoio em momentos difíceis. Aos amigos que conheci na UFC, Bruna, Fernanda, Ícaro e João.

Amigos do ensino médio e da vida, Adriano, Ingrid, Levi, Valeska e Valéria, que acompanharam por fora toda a minha trajetória na graduação e fizeram parte de momentos importantes da minha vida.

“Inteligência é a capacidade de se adaptar à mudança” (Stephen Hawking).

RESUMO

Após a idade do ferro, o aço tornou-se sinônimo de contemporaneidade e beleza nas cidades europeias. Com as duas guerras mundiais toda sociedade presenciou um enorme avanço tecnológico. Nesse contexto, o aço já existente começou a ser mais estudado e desenvolvido. Em 1913 foram criados os aços inoxidáveis, caracterizados pela sua cor brilhante e resistência à corrosão, esse material tornou-se também objeto de estudo ganhou bastante espaço na sociedade com diversos tipos de composição química, propriedades e aplicações diferentes. Diante desse contexto, este trabalho tem por objetivo analisar as microestruturas e propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis AISI 304, AISI 430 e AISI 420, bem como fazer um comparativo entre os mesmos. O trabalho foi realizado com base na literatura já existente, onde os dados colhidos de pesquisas já existentes foram relacionados. Com a pesquisa realizada, foram identificados muitos trabalhos que convergiam nos mesmos dados obtidos entre si e também com outras literaturas já existentes. Foi constatado que os AISI 420 possuem a melhor resistência mecânica entre os demais, o AISI 430 é o de mais baixo custo e também que os tratamentos térmicos são de importância imprescindível para se obter as propriedades mecânicas desejadas no material.

Palavras-chave: aços inoxidáveis; austeníticos; ferríticos; martensíticos; propriedades mecânicas; microestrutura.

ABSTRACT

After the Iron Age, steel became synonymous of contemporaneity and beauty in European cities. The two world wars, all society has seen an enormous technological advance. In this context, the existing steel began to be further studied and developed. In 1913 stainless steels were created, characterized by their bright color and corrosion resistance, this material has also become an object of study and has gained a lot of popularity in society with different types of chemical composition, properties and different applications. Given this context, this work aims to analyze the microstructures and mechanical properties of AISI 304 stainless steels. AISI 430 and AISI 420, as well as make a comparison between them. The work was carried out based on the existing literature, where the data collected from existing research were related. With the research carried out, many works were identified that converged on the same data obtained among themselves and also with other existing literature. It was found that the AISI 420 has the best mechanical resistance among the others, the AISI 430 has the lowest cost and it was concluded that the heat treatments are of essential importance to obtain desired mechanical properties in the material.

Keywords: stainless steels; austenitic; ferritics; martensitics; mechanical properties; microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Diagrama de equilíbrio de fases Ferro-Carbono.....	19
Figura 2	- Diagrama de Transformação Isotérmica (TCC).....	21
Figura 3	- Diagrama de Resfriamento Contínuo (TRC).....	21
Figura 4	- Alotropia do Ferro.....	22
Figura 5	- Micrografia da Fase Austenita.....	23
Figura 6	- Micrografia da Fase Ferrita.....	24
Figura 7	- Representação esquemática da formação de perlita a partir da austenita.....	25
Figura 8	- Micrografia de um aço com teor de carbono menor que 0,77% com microestrutura composta por ferrita primária e perlita.....	26
Figura 9	- Microestrutura martensítica em um aço.....	27
Figura 10	- Taxa de corrosão em função da quantidade de cromo presente no aço.....	31
Figura 11	- Diagrama de Schaeffler.....	32
Figura 12	- Família dos aços inoxidáveis austeníticos.....	33
Figura 13	- Família dos aços inoxidáveis ferríticos.....	34
Figura 14	- Família dos aços inoxidáveis martensíticos.....	35
Figura 15	- Corpo de prova para ensaio de tração.....	37
Figura 16	- Curva Tensão x Deformação.....	38
Figura 17	- Micrografia AISI 304 como recebido.....	45
Figura 18	- Micrografia AISI 304 com deformação plástica.....	45
Figura 19	- Propriedades mecânicas do AISI 304 em função da % de redução à frio.....	48
Figura 20	- Micrografia AISI 430 como recebido.....	50
Figura 21	- Micrografia AISI 420 como recebido.....	53
Figura 22	- Micrografia AISI 420 temperado e austenitizado a partir das temperaturas de 950°C (a), 1000°C (b), 1050°C (c) e 1100°C (d).....	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores médios de Limite de resistência à tração e escoamento para AISI 304, AISI 430 e AISI 420.....	59
Gráfico 2 - Valores médios de Dureza (HBR) AISI 304, AISI 430 e AISI 420.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Classificação dos aços conforme a SAE e AISI.....	28
Tabela 2	- Parâmetros de revenimento para os aços inoxidáveis martensíticos.....	40
Tabela 3	- Temperatura de solubilização para os aços inoxidáveis austeníticos.....	41
Tabela 4	- Composição química AISI 304.....	44
Tabela 5	- Propriedades Mecânicas AISI 304.....	46
Tabela 6	- Dureza (HV) em função do % de redução à frio.....	47
Tabela 7	- Propriedades mecânicas AISI 304 somente solubilizado.....	47
Tabela 8	- Propriedades mecânicas AISI 304 em função do % de redução à frio.....	48
Tabela 9	- Composição química AISI 430.....	49
Tabela 10	- Propriedades mecânicas AISI 430.....	51
Tabela 11	- Composição química AISI 420.....	52
Tabela 12	- Propriedades mecânicas AISI 420 como recebido.....	55
Tabela 13	- Valores de dureza AISI 420 para várias condições de austenitização e revenimento.....	56
Tabela 14	- Limite de resistência à tração e limite de resistência ao escoamento AISI 420 para várias condições de austenitização e revenido.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AISI - *American Iron and Steel Institute*
- CCC - Cúbico de Corpo Centrado
- CFC - Cúbico de Face Centrado
- TCC - Tetragonal de Face Centrado
- SAE - *Society of Automotive Engineers*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivos Gerais	16
2.2	Objetivos Específico.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	Aços.....	17
3.2	Microestrutura dos Aços.....	17
3.2.1	Microconstituintes dos Aços.....	22
3.2.1.1	Alotropia do Ferro.....	22
3.2.1.2	Austenita.....	23
3.2.1.3	Ferrita.....	24
3.2.1.4	Cementita.....	24
3.2.1.5	Perlita.....	25
3.2.1.6	Bainita.....	26
3.2.1.7	Martensita.....	27
3.3	Classificação dos Aços.....	28
3.3.1	Aços Carbono e Aços baixa-liga.....	28
3.3.2	Aços de Alta Liga.....	29
3.4	Aços Inoxidáveis.....	30
3.4.1	Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	32
3.4.2	Aços Inoxidáveis Ferríticos.....	34
3.4.3	Aços Inoxidáveis Martensíticos.....	35
3.5	Propriedades Mecânicas.....	36
3.6	Tratamento Térmicos.....	38
3.6.1	Recozimento.....	39
3.6.2	Têmpera e Revenimento.....	39
3.6.3	Solubilização.....	40
4	METODOLOGIA.....	42
4.1	Tipo de Pesquisa.....	42
4.2	Fontes de Dados.....	42

4.3	Coleta de Dados.....	42
4.4	Análise e interpretação de resultados.....	43
4.5	Aspectos Éticos	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5.1	Aço Inoxidável Austenítico AISI 304.....	44
5.1.1	Microestrutura.....	44
5.1.2	Propriedades mecânicas.....	45
5.1.3	Aplicações.....	49
5.2	Aço Inoxidável Ferrítico AISI 430.....	49
5.2.1	Microestrutura.....	49
5.2.2	Propriedades Mecânicas.....	50
5.2.3	Aplicações.....	51
5.3	Aço Inoxidável Martensítico AISI 420.....	52
5.3.1	Microestrutura.....	52
5.3.2	Propriedades Mecânicas.....	54
5.3.3	Aplicações.....	58
5.4	AISI 304 X AISI 430 AISI 420.....	58
5.4.1	Microestruturas.....	58
5.4.2	Propriedades Mecânicas.....	59
6	CONCLUSÕES.....	61
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	62
8	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da confecção de ferramentas e novos utensílios de ferro fundido no fim da pré-história, o homem modificou drasticamente sua forma de vida. Expansões territoriais aconteceram e as primeiras cidades começaram a surgir no continente Europeu. Até meados do início do século XIX, com a evolução de novas técnicas metalúrgicas de fundição e construção de fornos, o ferro fundido continuava sendo o principal metal da época, sendo utilizado na fabricação de armas de fogo e elementos estruturais para grandes instalações, como igrejas e prédios governamentais.

Porém, o ponto chave de virada da história aconteceu em 1856, quando se descobriu como era possível produzir aço em larga escala e baixo custo. O engenheiro metalurgista Henry Bessemer inventou o conversor de Bessemer, cujo princípio era a remoção das impurezas do ferro fundido por meio da oxidação das mesmas, causada por oxigênio soprado no seu interior. Mais tarde esse processo foi aperfeiçoado e a liga ferro-carbono tornou-se símbolo da contemporaneidade e, até os dias presentes, é um dos principais materiais usados nos ramos da construção civil e mecânica.

A partir do avanço da tecnologia, impulsionado principalmente pelas duas grandes guerras mundiais do século XX, os aços eram usados em situações que exigiam cada vez mais a resistência de materiais diante de altas pressões e temperaturas. Com isso, a ciência dos materiais abriu espaço para a incorporação de novos elementos químicos nessas ligas, que conferiam melhores propriedades e durabilidade desses materiais quando submetidas a ambientes corrosivos. Uma dessas aço-ligas de bastante importância são os chamados aços inoxidáveis, objetos de estudo deste trabalho.

O aço inoxidável foi desenvolvido em 1913, por Harry Brearley, que trabalhava em uma produtora de aço, na sua cidade natal, Sheffield, na Inglaterra. Ao ser designado para investigar uma nova liga metálica que fosse mais resistente à erosão, ao ser utilizada em canos de armas, Brearley acabou desenvolvendo uma liga mais resistente à corrosão, que continha o elemento cromo em sua composição química. A partir deste momento, o aço inoxidável passou a ser amplamente utilizado e mais pesquisas foram desenvolvidas em torno de sua microestrutura, composição química e propriedades mecânicas.

Esse tipo de aço especial ainda é subdividido em outras cinco classes, de acordo com a fase mais presente em sua microestrutura: aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis

austeníticos, aços inoxidáveis martensíticos, aços inoxidáveis endurecidos por precipitação e aços inoxidáveis duplex. Dentre essas cinco, as três primeiras serão abordados neste trabalho.

Como essas classes dos aços inoxidáveis têm características singulares que as fazem possuir propriedades diferentes entre si, diante de todo o contexto apresentado acerca da importância desses materiais para a ciência e aplicações em diversas atividades socioeconômicas, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo que relacione as microestruturas e propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico AISI 304, ferrítico AISI 430 e martensítico AISI 420 que definem a utilização/aplicação de cada um.

O estudo foi realizado com base em dados já publicados. Para apresentação e entendimento dos mesmos, este trabalho foi dividido em seis capítulos principais: introdução acerca do tema, objetivos do trabalho, referencial teórico, metodologia, resultados obtidos e conclusão.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Relacionar as microestruturas e propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austenítico AISI 304, ferrítico AISI 430 e martensítico AISI 420 que definem a utilização de cada um.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir o que são aço-ligas e aços inoxidáveis.
- Identificar e conceituar os aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos e martensíticos.
- Avaliar a microestrutura e as propriedades mecânicas que diferenciam os aços inoxidáveis austenítico AISI 304, ferrítico AISI 430 e martensítico AISI 420.
- Reunir de maneira didática e crítica as diferenças entre esses aços para os alunos iniciantes do curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, bem como para todo o público externo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de deixar o leitor ciente e aprofundar a discussão a respeito dos tópicos abordados no presente trabalho, nesta seção de referencial teórico serão apresentados os conceitos de aços, aços inoxidáveis, classificação dos aços inoxidáveis, produção dos aços inoxidáveis, microestrutura e propriedades mecânicas.

3.1 Aços

Diversos engenheiros metalurgistas e cientistas de materiais definem aços de formas diferentes, mas ao compreender cada definição, as mesmas possuem o mesmo significado. Segundo Callister (2016), aços são ligas de ferro-carbono que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga – existem milhares de ligas de aço com diferentes composições e/ou tratamentos térmicos. As propriedades mecânicas desses materiais são sensíveis ao teor de carbono, que normalmente é inferior a 1,00%p.

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor os aços comerciais não são ligas binárias, já que apresentam outros elementos secundários além do ferro e carbono, presentes devido ao processo de fabricação (CHIAVERINI, 2008).

Diante dessas características, para fins mais precisos, são considerados dois tipos fundamentais de aços (CHIAVERINI, 2008, p. 21):

- Aço-carbono ou liga de ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até cerca de 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação;
- Aço-liga ou “aço-carbono que contém outros elementos de liga ou apresenta elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais.”

3.2 Microestrutura dos Aços

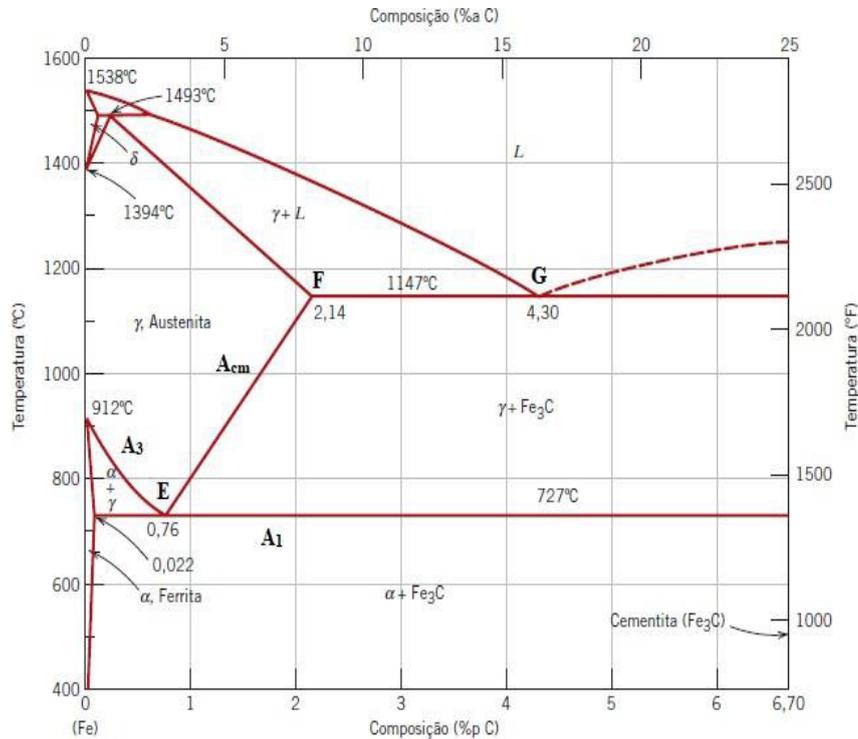
De acordo com Callister (2016), fase pode ser definida como uma porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes. No caso de sistemas com mais de uma fase, cada fase em particular será separada por uma fronteira, no qual, após ultrapassado os limites dessas, as características e propriedades se alteram.

Nos aços-liga, a microestrutura é caracterizada pelo número de fases presentes, por suas proporções e pela maneira segundo a qual elas estão distribuídas ou arranjas.

A microestrutura está intrinsecamente ligada à composição química do aço e pelos tratamentos térmicos aos quais são submetidos, o que justifica a importância do seu estudo (CALLISTER, 2016; OLIVEIRA, 2014).

Para entender mais sobre os aços-liga e suas microestruturas, é necessária a compreensão do diagrama de equilíbrio de fases Ferro-Carbono (Figura 1). Esse diagrama é representado até a composição de 6,7% de carbono, pois esse elemento forma com o ferro o composto Fe_3C , que contém aproximadamente 6,7% de carbono. Ligas que possuem uma quantidade de carbono acima desse teor apresentam pequena ou nenhuma importância comercial, por isso que o gráfico também é chamado de diagrama de equilíbrio de fases do sistema Fe- Fe_3C (CHIAVERINI, 2008).

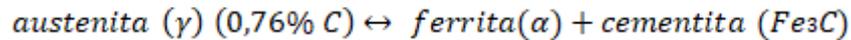
Figura 1 - Diagrama de equilíbrio de fases Ferro-Carbono



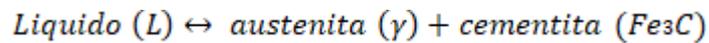
Fonte: Adaptado do Callister (2016)

No diagrama de equilíbrio Fe-C estudado, é possível notar a presença de algumas fases, como a ferrita (α), austenita (γ) e cementita (Fe_3C). Essas fases aparecem de acordo com a composição de carbono presente na liga e temperatura até em que é resfriado lentamente, ou seja, em condições de equilíbrio. Ainda, ao observar a Figura 1, notam-se algumas linhas com nomenclaturas e pontos específicos descritos a seguir:

- Linha A1 – Transformação de austenita (γ) em perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) na temperatura 727 °C.
- Linha A3 – Transformação de austenita(γ) em ferrita(α) na temperatura 912°C.
- Alinha Acm – Transformação da austenita(γ) em cementita (Fe_3C), iniciando na temperatura de 727°C e indo 1148°C.
- Ponto E – indica a presença para uma liga eutética para a composição de 0,76% de carbono a uma temperatura de 727°C. No resfriamento a austenita se decompõe em ferrita e cementita.



- Ponto G – Indica presença de uma liga eutética com 4,3% de carbono a uma temperatura de 1147°C, que é o mais baixo ponto de fusão ou solidificação. Nesse ponto ocorre uma reação eutética onde o líquido se solidifica para formar as fases austenita e cementita



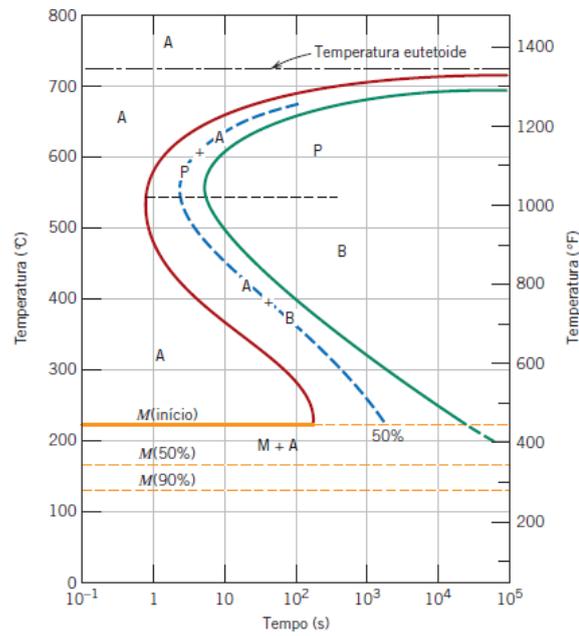
Através do diagrama de Ferro-Carbono é possível prever as microestruturas que são formadas nos aços de acordo com o teor de carbono presente na liga e quando a mesma é resfriada lentamente, ou seja, o equilíbrio térmico é mantido continuamente. Os constituintes básicos do aço formados nessas condições são a austenita, ferrita, cementita e perlita (CALLISTER, 2016; CHIAVERINI, 2008).

Entretanto, esses diagramas apresentam uma limitação, uma vez eles não levam em consideração a transformação de fases dependentes do tempo, isto é, fenômenos de difusão envolvidos e também fora do equilíbrio metaestável (CALLISTER, 2016). De acordo com Costa e Silva (1988), um aço resfriado lentamente a partir do campo da fase austenita, apresentará em temperatura ambiente uma ou mais constituintes de ferrita, perlita e cementita, dependendo do teor de carbono presente. Porém, se o resfriamento do aço a partir da região austenítica ocorrer muito rapidamente, em temperatura ambiente apresentará outros microconstituintes metaestáveis, como a bainita e martensita. Ambos não estão previstos no diagrama Fe-F₃C.

Para contornar essa limitação, foram desenvolvidos diagramas para transformação de fases que levassem em consideração o tempo e temperatura, ou seja, fora de condições de equilíbrio termodinâmico. Esses diagramas são os diagramas de transformação isotérmica (TTT), na qual a temperatura de transformação de fases é mantida constante ao longo de todo o processo; e diagramas de transformação por resfriamento contínuo (TRC), onde o resfriamento da liga ocorre continuamente até a temperatura ambiente. Os mesmos são mostrados na Figura 2 e Figura 3, respectivamente.

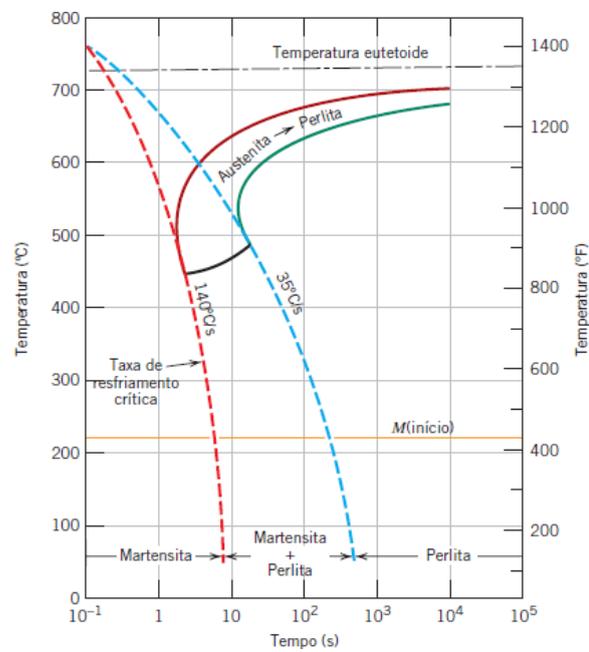
Pode-se notar que, em ambos os diagramas, tem-se a presença de dois novos microconstituintes citados anteriormente e que não aparecem no diagrama de equilíbrio de fases Ferro-Carbono, que são a bainita e a martensita. Ambos são metaestáveis. As características desses microconstituintes que podem se originar no aço e suas propriedades mecânicas serão discutidas a seguir.

Figura 2 - Diagrama de Transformação Isotérmica (TCC)



Fonte: Adaptado do Callister (2016)

Figura 3 - Diagrama de Resfriamento Contínuo (TRC)



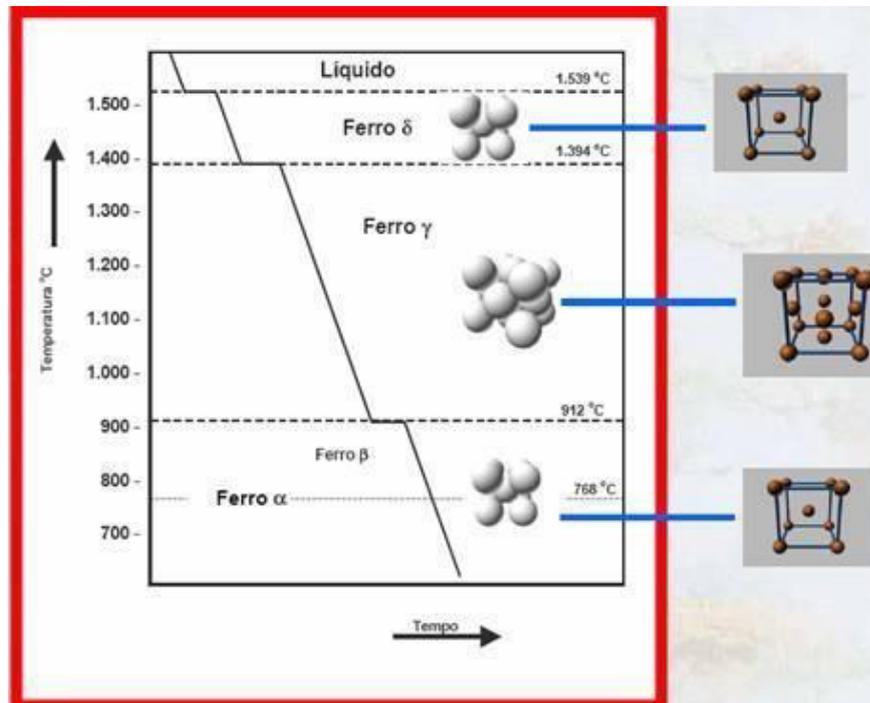
Fonte: Adaptado de Callister (2016)

3.2.1 Microconstituintes dos Aços

3.2.1.1 Alotropia do Ferro

De acordo com Chiaverini (1988), o ferro puro apresenta várias fases alotrópicas. Ao ser aquecido, ele apresenta duas mudanças de estruturas cristalinas até se fundir. Na temperatura ambiente, o ferro apresenta a forma estável conhecida como ferrita ou ferro alfa, que possui estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Na temperatura de 912°C, a ferrita sofre uma transformação polimórfica e sua estrutura cristalina muda para cúbica de facecentrada (CFC), essa fase é conhecida como austenita ou ferro gama. Ao ser aquecido continuamente até atingir temperatura de 1394°C, a austenita CFC muda para uma fase CCC novamente, chamada de ferrita delta, que persiste até ocorrer a sua fusão, a 1538°C (CALLISTER, 2016). Essas transformações polimórficas estão melhor ilustradas na Figura 4 a seguir:

Figura 4 - Alotropia do Ferro



Fonte: Caram (2000)

O ferro, quando combinado com carbono, formando o aço, dá origem aos

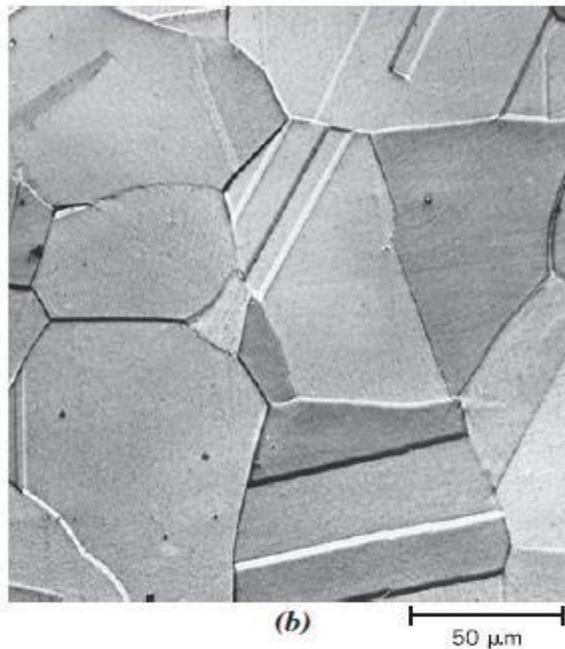
constituintes austenita, ferrita, cementita, perlita, bainita e martensita. O surgimento destes está associado ao teor de carbono presente na liga e forma de resfriamento.

3.2.1.2 Austenita

Essa fase só é estável acima de 727°C , consta em uma solução sólida de carbono no ferro gama, apresenta uma estrutura de grãos poligonais irregulares e é não magnética. Possui boa resistência mecânica e apreciável tenacidade (CHIAVERINI, 1988).

A solubilidade máxima do carbono na austenita, ocorre no teor de 2,14% e na temperatura de 1147°C . As transformações de fases envolvendo a austenita são muito importantes nos tratamentos térmicos dos aços (CALLISTER, 2016). A Figura 5 mostra a micrografia da austenita de um aço carbono comum.

Figura 5 - Micrografia da Fase Austenita



Fonte: Adaptado de Callister (2016)

3.2.1.3 Ferrita

É o ferro no estado alotrópico alfa, contendo, em solução, traços de carbono; apresenta também uma estrutura de grãos poligonais irregulares; tem baixa dureza e baixa resistência à tração, mas, em contrapartida, possui excelente resistência ao choque e elevado alongamento (CHIAVERINI, 1988).

Forma-se por difusão, a partir do resfriamento da austenita, nucleando nos contornos de grãos da austenita. Na ferrita alfa CCC, somente pequenas concentrações de carbono são solúveis, a solubilidade máxima é de 0,022% a 727°C. É uma fase macia e pode se tornar magnética em temperaturas abaixo de 768°C (CALLISTER, 2016; COSTA E SILVA, 1988).

A Figura 6 mostra a fase ferrita em um aço.

Figura 6 - Micrografia da Fase Ferrita



Fonte: Adaptado de Callister (2016)

3.2.1.4 Cementita

É o carboneto de ferro (Fe_3C) contendo 6,7% de carbono. Muito dura, quebradiça, é responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como pela sua menor ductilidade. Possui estrutura cristalina ortorrômbica.

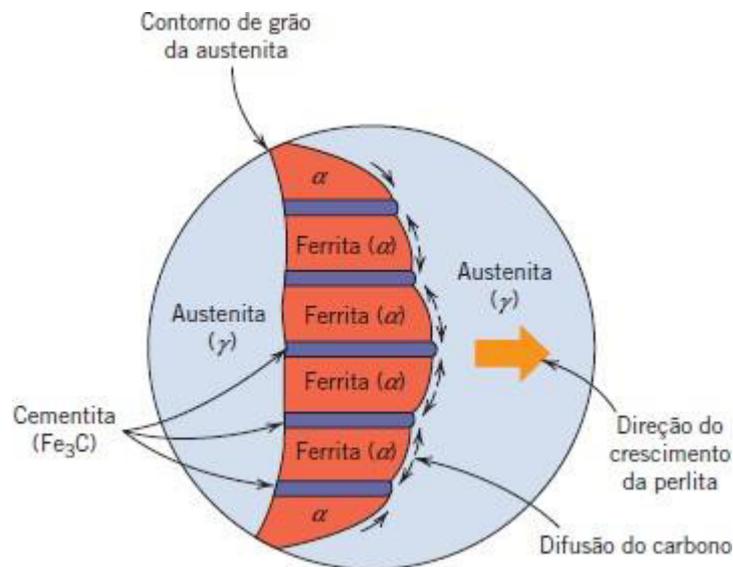
De acordo com Callister (2016), a cementita forma-se quando o limite de solubilidade para o carbono na ferrita alfa é excedido.

3.2.1.5 Perlita

Pela definição de Chiaverini (1988), a perlita é a mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita na forma de lâminas finas alternadas entre si. As propriedades mecânicas da perlita dependem da espessura das lamelas de cementita e esta, por sua vez, da velocidade de sua formação. Sendo assim, a perlita possui propriedades intermediárias entre a ferrita e a cementita.

As camadas de ferrita e cementita se formam simultaneamente durante a transformação de fases. Os átomos de carbono se difundem para longe das regiões de perlita, em direção às camadas de cementita conforme a microestrutura vai se desenvolvendo do contorno de grão da austenita para o seu interior/centro (CALLISTER, 2016).

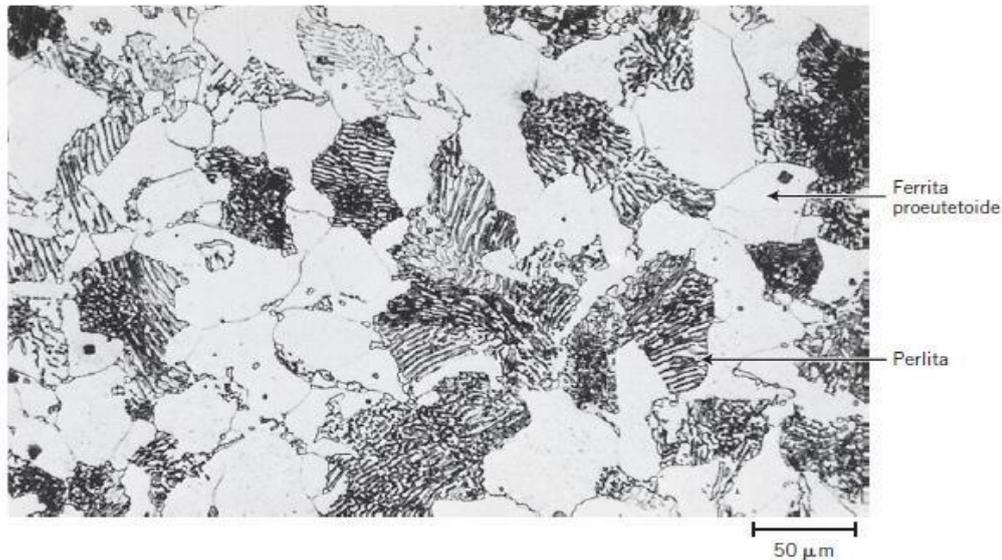
Figura 7 - Representação esquemática da formação de perlita a partir da austenita.



Fonte: Adaptado do Callister (2016)

Se um aço possui um teor de carbono inferior a 0,77% é resfriado lentamente, o resultado da microestrutura é uma formação inicial de ferrita (chamada de ferrita primária), até que a austenita restante se transforma em perlita. Já se o aço possuir composição de carbono acima de 0,77%, ocorre formação inicial de cementita (chamada de cementita primária e a austenita restante se transforma em perlita.

Figura 8 - Micrografia de um aço com teor de carbono menor que 0,77% com microestrutura composta por ferrita primária e perlita.



Fonte: Adaptado de Callister (2016)

3.2.1.6 Bainita

É um microconstituente resultado da transformação austenítica. A mesma possui sua estrutura ferrita e cementita e se forma como agulhas ou placas. A estrutura da bainita é tão fina que alguns de seus detalhes só conseguem ser vistos com microscopia de varredura (CALLISTER, 2016).

A bainita é classificada como superior ou inferior, de acordo com a temperatura em que é formada (CHIAVERINI, 1988 p. 65):

- A superior é formada por finas (0,5 μm de largura) ripas de ferrita com cementita precipitada em seus contornos. Em aços com baixo carbono a cementita ocorre na forma isolada ou em fileiras contínuas ao longo do contorno das ripas, e em aços com alto carbono, essas fileiras podem tornar-se contínuas.
- A inferior é formada em regiões próximas da martensita, apresentando-se na forma lenticular (ou de agulhas), parecida com a martensita. Essas agulhas nucleiam no interior e no contorno de grão da austenita, com agulhas secundárias formadas a partir de primárias.

3.2.1.7 Martensita

De acordo com Callister (2016), a martensita é um microconstituente ou fase resultante do rápido resfriamento (têmpera) da austenita até temperaturas mais baixas. A taxa de resfriamento ocorre é tão brusca e elevada que não há tempo suficiente para ocorrer a difusão dos átomos de carbono. Para todos os fins práticos, é uma transformação independente do tempo e, em função exclusivamente da temperatura, até a qual a liga é resfriada, transformações desse tipo são chamadas de atérmicas.

Essa fase metaestável e fora do equilíbrio é caracterizada por ser uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro tetragonal de corpo centrado (TCC). O deslocamento da austenita CCC acontece coordenadamente e com baixa mobilidade, ocorrendo o cisalhamento da estrutura. Esses movimentos coordenados dos átomos de carbono são conhecidos como movimentos militares (COLPAERT, 2008).

O teor de carbono apresenta influência direta na morfologia dessa fase. A martensita pode se apresentar na forma de ripas ou agulhas (também conhecida como acicular) para aços de baixo teor de carbono 0,6% ou na forma de placas, para aços com teores maiores.

Do ponto de vista das propriedades mecânicas, a martensita apresenta elevada dureza e muita fragilidade. Essa dureza é explicada pelo carbono que fica no reticulado do ferro TCC, impedindo o escorregamento, também devido à grande quantidade de tensões internas e tamanho de grão muito pequeno. O teor de carbono também influencia diretamente na dureza. (CHIAVERINI, 2008).

Figura 9 - Microestrutura martensítica em um aço.



Fonte: Adaptado de Callister (2016)

3.3 Classificação dos Aços

Devido à grande diversidade de tipos de aços, esses materiais podem ser classificados de acordo com suas inúmeras características que podem apresentar. Essas classificações são regularmente submetidas a revisões. Dessa forma os aços podem ser classificados de acordo com a sua composição química, processo de acabamento, forma do seu produto final e suas aplicações na sociedade (CHIAVERINI, 2008).

A mais importante e mais utilizada classificação, que é a adotada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (Norma Brasileira – 6006) e que segue os critérios do *American Iron and Steel Institute* (AISI) e da *Society of Automotive Engineers* (SAE), dois institutos de engenharia referência, usa a composição química como critério para classificação dos aços (COSTA E SILVA, 1988).

Essa norma classifica os aços em dois grandes grupos: aços carbono e aços baixa-liga; e os aços alta-liga.

3.3.1 Aços Carbono e Aços baixa-liga

Os aços carbono são aqueles cujo carbono é encontrado em teores menores que 1%p. As microestruturas e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas variam de acordo com a quantidade de carbono presente na liga. Nessas ligas também são encontrados elementos residuais resultantes do processo de fabricação do aço, como o manganês, silício, fósforo e enxofre nos teores considerados normais (CALLISTER, 2016; CHIAVERINI, 2008).

Os aços baixa liga são os aços onde ocorre a presença de elementos de liga em teores considerados acima dos normais (entre 3%p e 3,5%p). A presença desses elementos de liga ainda não é o suficiente para alterar de forma mais brusca a microestrutura desses aços.

Seguindo a nomenclatura da ABNT, o sistema numérico para identificação desses aços é composto por quatro algarismos e é interpretado da seguinte maneira: os dois primeiros dígitos referem-se ao tipo de aço carbono ou aço liga e os dois últimos referem-se a teor de carbono presente na liga multiplicado por 100. Em alguns casos esses quatro algarismos podem ser precedidos por um algarismo que especifica qual processo de fusão o aço sofreu (COSTA E SILVA, 1988).

Tabela 1 - Classificação dos aços conforme a SAE e AISI

Sistema de classificação SAE e AISI dos aços		
Designação		Tipo de aço
SAE	AISI	
10XX	C 10XX	Aços - carbono comuns
11XX	C 11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
13XX	13XX	Aços - manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços - níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços - níquel com 5,0% de Ni
31XX	31XX	Aços - níquel - cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E 33XX	Aços - níquel - cromo com 3,50% de Ni e 1,57% de Cr
303XX	-	Aços resistentes a corrosão e ao calor Ni - Cr
40XX	40XX	Aços - molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços - cromo - molibdênio com 0,50% ou 0,95% de Cr e 0,12%, 0,20% ou 0,25% de Mo.
43XX	43XX	Aços - níquel - cromo - molibdênio com 1,82% de Ni, 0,50 ou 0,80% de Cr e 0,25% de Mo.
46XX	46XX	Aço - níquel - molibdênio com 1,57% ou 1,82% de Ni E 0,20% OU 0,25% de Mo.
47XX	47XX	Aços - níquel - cromo - molibdênio com 1,05% de Ni, 0,45 de Cr e 0,20% de Mo.
48XX	48XX	Aços - níquel - molibdênio com 3,50% de Ni e 0,25% de Mo.
50XX	50XX	Aços - cromo com 0,27%, 0,40% ou 0,50% de Cr.
51XX	51XX	Aços - cromo com 0,80% a 1,05% de Cr
501XX	-	Aços de baixo cromo para rolamentos, com 0,50% de Cr
511XX	E 511XX	Aços de médio cromo para rolamentos, com 1,02 de Cr.
521XX	E 521XX	Aços de alto cromo para rolamentos, com 1,45% de Cr.
514XX	-	Aços resistentes a corrosão e ao calor ao Cr.
515XX	-	Aços resistentes a corrosão e ao calor ao Cr
61XX	61XX	Aços - cromo - vanádio com 0,80% ou 0,95% de Cr e 0,10 ou 0,15% de V (min.)
86XX	86XX	Aços - níquel - cromo - molibdênio com 0,55% de Ni, 0,50 ou 0,65% de Cr e 0,20% de Mo.
87XX	87XX	Aços - níquel - cromo - molibdênio com 0,55% de Ni, 0,50% de CR e 0,25% de Mo.
92XX	92XX	Aços - silício - manganês com 0,65%, 0,82%, 0,85% de 0,87% de Mn, ou 2,00% de Si e 0%, 0,17%, a,32% ou 0,65% de Cr
93XX	93XX	Aços - níquel - cromo - molibdênio com 3,25% de Ni, 1,20% de Cr e 0,12% de Mo.
98XX	98XX	Aços - níquel - cromo - molibdênio com 1,00% de Ni, 0,80de Cr e 0,25% de Mo.
950	-	Aços de baixo teor em liga e alta resistência.
XXBXX	XXBXX	Aços - boro com 0,0005% de B min.
XXLXX	CXXLXX	Aços - chumbo com 0,15% - 0,35% de Pb.

Fonte: Cruz (2014)

3.3.2 Aços de Alta Liga

São aqueles cuja presença de elementos de liga é entre 10% p e 12% p. No caso desses aços, os elementos de liga são adicionados para conferir propriedades diferenciadas como resistência à corrosão, ao desgaste, altas temperaturas e meios criogênicos. Segundo Chiaverini (2008), os elementos de liga alteram sua estrutura profundamente e também os

tratamentos térmicos aos quais podem ser submetidos, exigindo mais cuidado e operações múltiplas para se chegar ao resultado esperado.

A ABNT classifica os aços alta-liga em duas classes distintas: aços resistentes à corrosão e a altas temperaturas (inoxidáveis) e aços ferramenta. Os aços inoxidáveis, tema deste trabalho, serão melhor explicados a seguir e suas características microestruturais e propriedades serão discutidas no capítulo de análise e discussão de resultados.

3.4 Aços Inoxidáveis

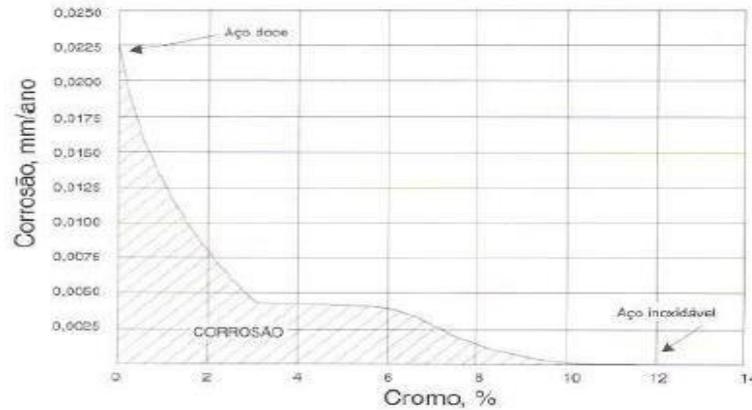
Os aços inoxidáveis são classificados como aços de alta-liga. São ligas a base de ferro, com baixo teor de carbono, variando de 0,03% e 1% e que necessitam no mínimo de 10,5 % de cromo em sua composição. Esses tipos de aços são bastante conhecidos por “Stainless Steel” que significa “aço que não mancha”, isso porque a principal característica desses aços é sua resistência à corrosão, assim, eles dificilmente apresentam o aspecto de ferrugem em sua superfície.

Elementos como o níquel, nióbio, molibdênio, alumínio e manganês podem ser adicionados a estas ligas para se obter algumas propriedades diferentes, porém o cromo é o elemento primordial que oferece a característica de resistência à corrosão desses aços (CHIAVERINI, 2008).

O cromo, quando adicionado em teores acima de 10,5% nas ligas, é o principal responsável por um fenômeno chamado de passivação. Este elemento combina-se com o oxigênio presente no ar e água, formando uma fina camada sobre a superfície do metal. A camada passivadora é transparente, resistente, aderente e estável, conferindo ao aço uma proteção em meios oxidantes (CARBÓ, 2008).

Por essas características da camada de passivação, faz com o que os aços sejam utilizados em mais alternativas e apresentem melhor desempenho quando comparados aos aços inoxidáveis comuns. A Figura 10 ilustra a taxa de corrosão variando de acordo com a quantidade de cromo presente na liga. Conclui-se que, quanto maior o teor de cromo, menos suscetível à corrosão a liga fica.

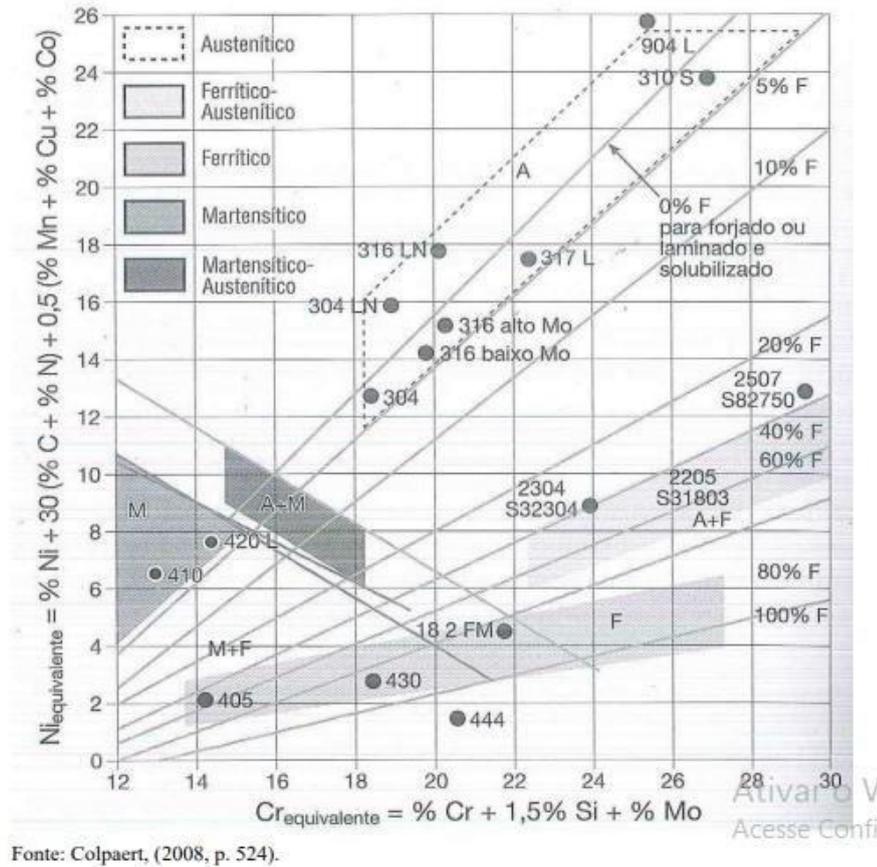
Figura 10 – Taxa de corrosão em função da quantidade de cromo presente no aço



Fonte: Infomet – Aços e Ligas (2021)

Os aços inoxidáveis são classificados de acordo com a microestrutura que apresentam em temperatura ambiente, diante disso são considerados os aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos. A microestrutura final apresentada por esses aços é determinada pela presença de elementos de liga com seus respectivos teores, que podem atuar como estabilizadores de uma fase ou outra. O diagrama de Schaeffler (Figura 11), que é bastante usado como fonte de apoio nos processos de soldagem dos aços inoxidáveis, mostra os campos austeníticos, ferríticos e martensíticos, considerando os teores de níquel e cromo presentes.

Figura 11 – Diagrama de Schaeffler



Fonte: Colpaert (2008)

As classes dos aços inoxidáveis serão apresentadas brevemente a seguir, pois no capítulo seguinte suas propriedades e microestruturas serão discutidas e comparadas.

3.4.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos constituem o maior e mais popular grupo dos aços inoxidáveis. Esses aços podem ser divididos ainda em dois subgrupos: aços ao cromo-níquel e aços ao cromo-níquel-mangânês, onde no primeiro encontramos a maior parte dos aços inoxidáveis empregados atualmente. O teor de cromo nos aços inoxidáveis austeníticos varia de 16 a 30% e o de níquel de 8 a 35%; o teor de carbono é inferior a 0,08% (CHIAVERINI, 2008).

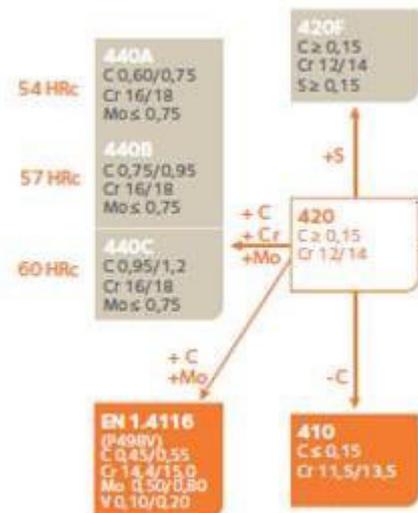
Os aços inoxidáveis austeníticos são caracterizados por não serem magnéticos, não são endurecíveis (pois são austeníticos) e sua dureza aumenta quando é encruado. Possuem também excelente resistência à corrosão, boa ductilidade e soldabilidade (CARBÓ, 2008;

3.4.3 Aços Inoxidáveis Martensíticos

São originados por meio do tratamento térmico de têmpera e ferro-magnéticos. Os aços inoxidáveis martensíticos contêm entre 11,5% e 18% de cromo em sua composição, podem ser trabalhados tanto a quente como a frio e possuem boa resistência à corrosão. São utilizados após passarem pelo tratamento térmico de revenimento ou recozimento, para a obtenção de boas propriedades mecânicas e para que eles possam ser trabalhados mecanicamente (CHIAVERINI, 2008).

Esses aços também são da série 4XX, conforme a classificação pela AISI. O mais popular aço inoxidável martensítico e objeto de estudo do presente trabalho é o AISI 420, que possui 12% de cromo e 0,35% de carbono em sua composição. Somente após a têmpera, os aços inoxidáveis martensíticos tornam-se resistentes à corrosão, pois o carbono presente na composição forma a estrutura martensítica, evitando assim a possibilidade de precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grãos (CARBÓ, 2008).

Figura 14 - Família dos aços inoxidáveis martensíticos



Fonte: Carbó (2008)

3.5 Propriedades Mecânicas

Os aços, ao serem utilizados nas suas aplicações específicas, são submetidos a uma série de forças e deformações. Para isso, é necessário que eles atendam a essas exigências e possam desempenhar seu papel com segurança e eficiência. Nesse contexto, os engenheiros metalurgistas e de materiais estão focados na fabricação e pesquisa de materiais que atendam os requisitos necessários para as suas aplicações.

Desse modo, as propriedades mecânicas dos materiais podem ser avaliadas em laboratórios, através de ensaios práticos com aparelhos específicos seguindo as normas da ABNT. Ao final, eles entregam resultados quantitativos que caracterizam os materiais.

As principais propriedades mecânicas ligadas à resistência do material são as seguintes (TSCHIPTSCHIN, 2020):

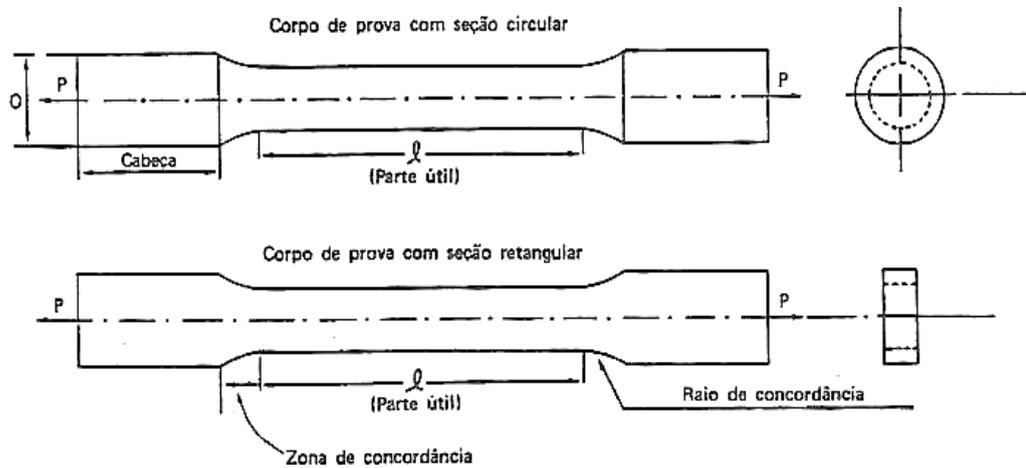
- Dureza: é uma medida da resistência à deformação plástica induzida por penetração de um indentador ou de uma partícula abrasiva.
Limite de escoamento: a tensão máxima que pode ser aplicada sem que o material sofra deformação permanente ou irreversível.
- Limite de resistência: tensão máxima que um material aguenta quando tracionado (esticado) antes de quebrar. A aplicação de esforços maiores que o limite de resistência causa fratura do material.
- Alongamento máximo: é a deformação que um material aguenta quando tracionado (esticado) antes de quebrar.
- Tenacidade: é a capacidade de um aço absorver energia e deformar plasticamente sem fraturar.
- Limite de fadiga ou resistência à fadiga: é a tensão abaixo da qual um material pode ser submetido a um número infinito de ciclos de esforços sem causar uma fratura por fadiga.

No caso dos aços, as propriedades mecânicas dependem da microestrutura final que eles apresentam e da composição química. Diversos elementos de liga podem ser adicionados para conferir propriedades diferenciadas.

Os ensaios de tração são alguns dos mais comuns ensaios realizados nos materiais metálicos. Nele, o material que está no formato de um corpo de prova especificado

pela norma (Figura 15), é colocado na máquina de ensaio de tração e submetido a uma carga axial até sofrer ruptura.

Figura 15 - Corpo de prova para ensaio de tração

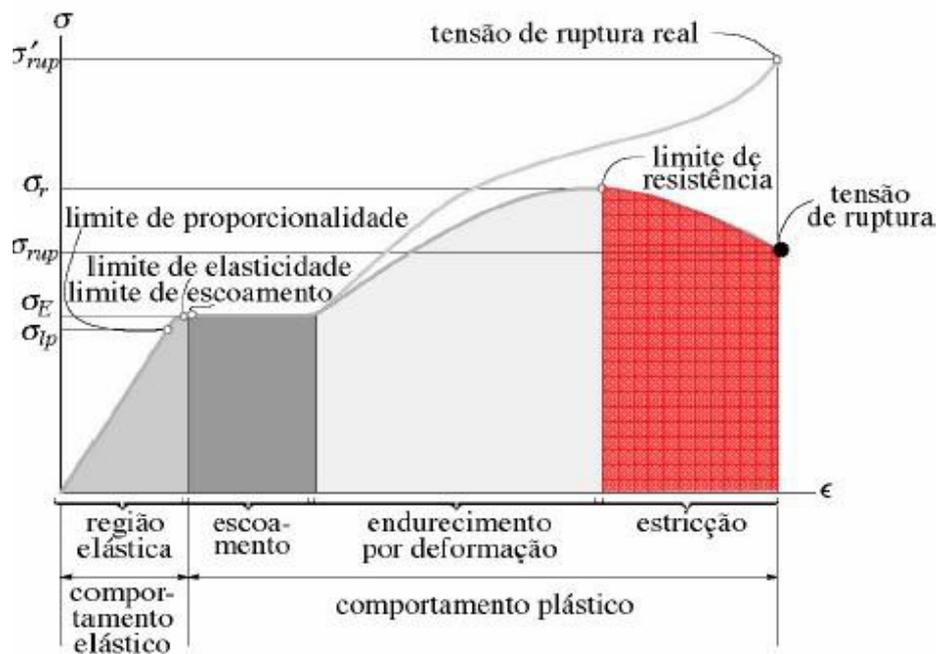


Fonte: Biopid (2021)

À medida em que o corpo de prova é submetido a carga, inicialmente ele sofre uma deformação elástica. Ou seja, se a carga for retirada ele pode retornar à sua forma original. Dando continuidade ao ensaio, o corpo entra em deformação plástica, sofrendo alongamento até ocorrer a ruptura.

Ao realizar o ensaio de tração é possível obter curva tensão x deformação, que fornece algumas propriedades do material, como limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência e outras. A Figura 16 ilustra o gráfico e os pontos específicos onde obtemos os valores das propriedades citadas anteriormente.

Figura 16 - Curva Tensão x Deformação



Fonte: Info Solda (2020)

3.6 Tratamentos Térmicos

Segundo Costa e Silva (1988, p. 81), tratamento térmico pode ser definido como:

“um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou lhes conferir características específicas.”

Como as propriedades dos aços dependem da sua microestrutura, os tratamentos térmicos podem promover a alteração da mesma e conseqüentemente das propriedades dos aços. Dessa forma, os aços são submetidos a tratamentos térmicos para redução das tensões internas; modificação das propriedades mecânicas e melhora da resistência ao desgaste, calor, corrosão e propriedades de corte (CHIAVERINI, 2008).

Os principais tratamentos térmicos aplicados aos aços inoxidáveis são os de recozimento, têmpera, revenimento e solubilização. Esses tratamentos serão abordados brevemente a seguir. Poderemos notar o impacto direto dos mesmos no valor das propriedades mecânicas e conseqüentemente aplicações desses aços.

3.6.1 Recozimento

Consiste em submeter o aço a uma temperatura maior que a sua de austenitização e depois promover o resfriamento lento do mesmo. Quanto maior a temperatura de austenitização, mais homogênea será a austenita e menor a chance de nucleação de carbonetos não dissolvidos. Esse tratamento visa reduzir a dureza do material e melhorar sua usinabilidade.

O recozimento é bastante aplicado nos aços inoxidáveis martensíticos para obtenção de uma microestrutura mais fácil de ser deformada plasticamente e alívio das tensões internas. Também é aplicado nos inoxidáveis ferríticos, para aliviar as tensões resultantes dos processos de conformação que sofrem durante a sua produção (COSTA E SILVA, 1988).

É importante ressaltar que quando aquecidos ou resfriados lentamente por volta de 475°, ocorre nos aços inoxidáveis ferríticos a presença da fase sigma. Essa fase sigma promove a fragilidade do material, com aumento da dureza e queda da ductilidade, aparecendo principalmente nos aços com 25% a 35% de cromo. Por isso, esses aços devem ser recozidos a temperaturas maiores que essas (COSTA E SILVA, 1988).

3.6.1 Têmpera e Revenimento

A têmpera consiste em elevar o aço a faixa de temperaturas na sua região de austenitização e depois promover o resfriamento rápido em meios de ar, água ou até mesmo óleo. O rápido resfriamento impede a difusão dos carbonos, formando a martensita, microestrutura caracterizada por alta dureza e fragilidade.

Devido ao rápido e brusco resfriamento, grandes gradientes de temperatura surgem do centro a superfície da amostra tratada, contribuindo para o surgimento de tensões internas. Dependendo da magnitude dessas tensões pode ocorrer deformação plástica ou ruptura da peça (COSTA E SILVA, 1988).

Para contornar a alta dureza, alta fragilidade e baixa tenacidade dos materiais que passam pelo tratamento de têmpera, pode ser realizado o revenimento. O revenimento consiste no aquecimento da peça logo após a têmpera, em temperaturas abaixo da sua zona de austenitização. O material pode ser mantido nessa condição de temperatura até que o calor se espalhe uniformemente sobre toda a sua extensão e atinja as propriedades desejadas. O revenimento pode ser aplicado nas faixas de temperatura de 25°C-200°C, 250°-350°C e 400°C-700°C (COSTA E SILVA, 1988; PAREDES, 2020)

A têmpera e revenimento são aplicados principalmente nos aços inoxidáveis

martensíticos. Geralmente sempre após a tempera é realizado um revenido de 150°C a 400°C para o alívio de tensões, sem modificar muito as propriedades mecânicas. O revenimento propriamente aplica-se na faixa de 400°C a 750°C. Na Tabela X, tem-se as principais condições adequadas de temperatura, tempo e meio para realizar a têmpera e o revenimento nos aços inoxidáveis martensíticos.

Tabela 2 - Parâmetros de revenimento para os aços inoxidáveis martensíticos

Tipo AISI	Têmpera			Revenido		
	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Meio de resfriamento	Temperatura [°C]	Tempo [h]	Dureza Brinell
403	925/1000	15 a 30	Óleo	225/375	1 a 3	360/380
410	925/1000	15 a 30	Óleo	225/375	1 a 3	360/380
414	975/1050	15 a 30	Óleo ou ar	225/400	1 a 3	370/400
416	925/1000	15 a 30	Óleo	225/375	1 a 3	360/380
431	975/1075	15 a 30	Ar, óleo ou água	225/400	1 a 3	370/400
420	975/1050	15 a 30	Ar, óleo quente	150/375	1 a 2	470/530
440 ^a	1000/1075	15 a 30	Idem	150/375	1 a 2	500/560
440B	1000/1075	15 a 30	Idem	150/375	1 a 2	520/590
440C	1000/1075	15 a 30	Idem	100/375	1 a 2	540/620

Fonte: Paredes (2020)

3.6.3 Solubilização

Consiste no aquecimento do aço a uma determinada temperatura que é mantida por tempo necessário capaz de promover a dissolução completa dos constituintes na matriz austenítica homogeneamente. Logo em seguida é aplicado um rápido resfriamento para manter esses constituintes desejados em solução, evitando assim o surgimento de precipitados que possam ser prejudiciais as propriedades mecânicas e de resistência a corrosão do material (COSTA E SILVA, 1988).

O tratamento térmico de solubilização é aplicado principalmente nos aços inoxidáveis austeníticos para promover a completa dissolução dos carbonetos de cromo Cr₂₃C₆ que comumente se precipitam nos contornos de grãos. A solubilização também é aplicada para o alívio de tensões internas.

O resfriamento rápido impede a precipitação dessas fases e faz com que o carbono e cromo permaneçam em solução sólida na matriz austenítica supersaturada decarbonos e livre de carbonetos no seus contornos de grãos (COSTA E SILVA, 1988).

Tabela 3 - Temperatura de solubilização para os aços inoxidáveis austeníticos

Tipo	Temperatura [°C]
201, 202	1010/1120
301, 302, 302B	1010/1120
303, 303 SE	1010/1120
304, 305, 308	1010/1120
304 L	1010/1120
309, 309 S	1040/1120
310, 310 S	1040/1065
314	1040/1120
316	1040/1120
317	1065/1120
316L, 317L	1040/1105
321	955/1065
347, 348	980/1065

Fonte: Paredes (2020)

4 METODOLOGIA

4.1 Tipo de Pesquisa

O trabalho foi desenvolvido com base em conceito de estudo exploratório, fundamentado por meio de uma pesquisa bibliográfica já difundida, constituída de livros e artigos científicos (GIL, 2008, p.50).

4.2 Fontes de Dados

As fontes utilizadas para a construção do referencial teórico baseiam-se direta e indiretamente de livros de metalurgia e materiais relacionados a aços e tratamentos térmicos. Alguns livros foram dos autores Hubertus Colpaert, Costa e Silva, William Callister e Vicente Chiaverini.

Para a construção dos resultados foi utilizado o *handbook* da ASM; uma série de artigos disponíveis no *Science Direct* que foram publicados em revistas e jornais da área de materiais e metalurgia; catálogos técnicos de grandes multinacionais produtoras de aços, monografias de conclusão de curso e também foi utilizado diversas teses acessadas pela Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD).

4.3 Coleta de Dados

Para a coleta de dados foi feito uma espécie de triagem entre os mais de sessenta artigos selecionados inicialmente para verificar quais desses realmente se encaixavam nos critérios de pesquisa e tema do trabalho.

Após isso, os artigos selecionados foram lidos criteriosamente, onde as informações mais importantes foram separadas, dados numéricos foram organizados em tabelas e imagens coletadas também.

Os critérios para a seleção dos materiais é que eles abordassem aços inoxidáveis em específico os AISI 304, AISI 420 e AISI 430 e também cujo o objeto principal de estudo fossemos tratamentos térmicos, microestruturas e propriedades mecânicas desses materiais.

4.4 Análise e interpretação de resultados

Todos os dados relevantes foram discutidos, relacionados e comparados de modo a contribuir à temática do estudo e objetivos do trabalho.

4.5 Aspectos éticos

Durante a realização do estudo, todos os autores foram devidamente citados, de acordo com a norma ABNT NBR 6023, que aborda a produção referências e compilação de dados. Desse modo, a exclusiva finalidade da coleta dos dados deste estudo foi científica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados os aspectos de microestrutura, propriedades mecânicas e aplicações dos aços inoxidáveis especificados já anteriormente. Toda essa abordagem será feita com base na literatura difundida. Ao final foi feita uma comparação entre as microestruturas e propriedades dos três tipos de aços.

5.1 Aço Inoxidável Austenítico AISI 304

O aço inoxidável austenítico AISI 304 é o mais popular e mais utilizado entre os aços inoxidáveis, esse material possui a seguinte composição química, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química AISI 304

AISI	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %
304	0,08 (máx)	1,00 (máx)	0,75 (máx)	0,045 (máx)	0,03 (máx)	18,00 – 20,00	8,00 – 10,5	-

Fonte: ASM (1998)

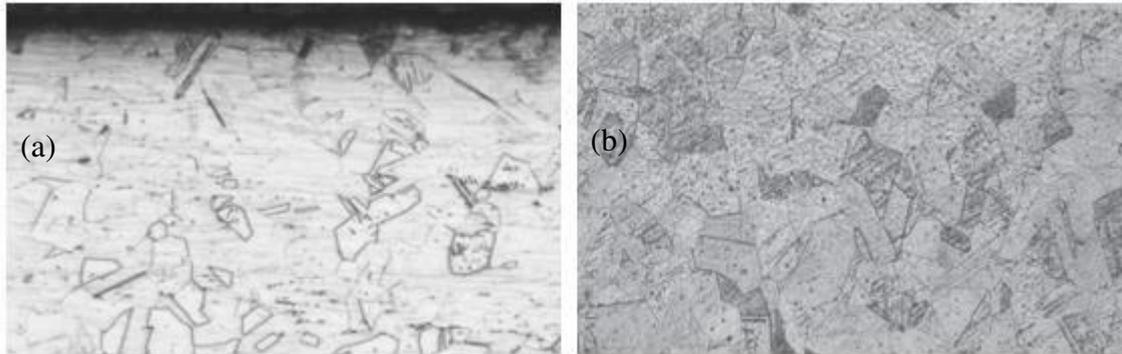
Os AISI 304 também são conhecidos como aços inoxidáveis austeníticos estáveis, isso porque os elementos Cromo-Níquel na relação de composição 18-8 conseguem manter a austenita estável em temperatura ambiente, as vezes até mesmo em casos de alta deformação a frio.

5.1.1 Microestrutura

Ao observar a figura x identificamos a microestruturas de dois AISI 304 como recebidos diretamente do seu processo de produção, identificadas pelos trabalhos de Machado (2017) (Figura 17 (a)) e Bai et al (2014) (Figura 17 (b)). Em ambos os trabalhos podemos notar a presença de grãos equiaxiais monofásicos de austenita, sem sinal de deformação plástica, quem também converge com os resultados de Colpaert (2008) Já na figura 18, obtida pelo trabalho de Júnior (2006), observamos a microestrutura de um AISI 304 com grãos equiaxiais de austenita, mais marcados e definidos, indicando que esse material sofreu algum tipo de deformação plástica. Se existe a presença de alguma martensita originada da deformação, essa

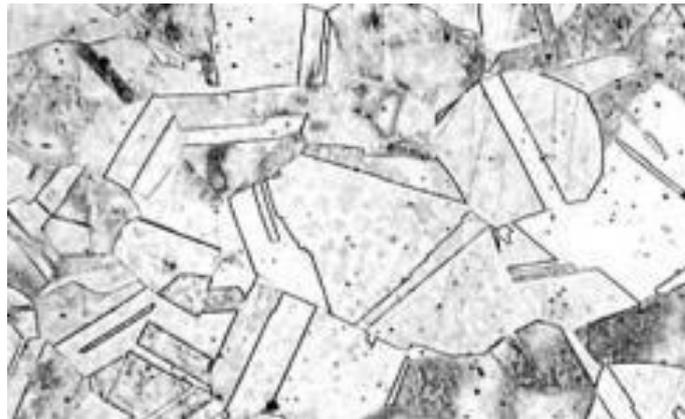
é possível ser identificada a partir de técnicas mais avançadas de microscopia. Essas características microestruturais também convergem com as apresentadas por Colpaert (2008).

Figura 17 - Micrografia AISI 304 como recebido



Fonte: Adaptado de Machado (2017) e Bai et al. (2014)

Figura 18 - Micrografia AISI 304 com deformação plástica



Fonte: Júnior (2006)

5.1.2 Propriedades mecânicas

De modo geral, os aços inoxidáveis austeníticos da série 300 e em específico o AISI 304 apresenta altos valores na relação limite de resistência/limite de escoamento, junto a ótimas propriedades de resistência mecânica a temperatura ambiente, além de boa ductibilidade e tenacidade. Essas características de alta plasticidade, permite que esses aços possam ser trabalhados a frio e sofrer encruamento, atingindo valores ainda melhores de limite de escoamento e ruptura (LIPPOLD, 2005; COSTA E SILVA, 1988).

Na Tabela 5, temos os valores das propriedades mecânicas para os AISI 304 como recebidos diretamente do processo de fabricação obtidas de diversas fontes diferentes. Tomando como referência os valores fornecidos pela ASM (1998), podemos notar que todos convergem nos resultados e que esses são bastante próximos entre si.

As diferenças podem se dar devido a pequenas diferenças de composição química ou até mesmo de erros experimentais no momento da realização dos ensaios. Nos trabalhos de Gonzales et al. (2003) e Júnior (2006), notamos uma diferença considerável para os limites de resistência (770 MPa) e limite de escoamento (466 MPa), respectivamente, quando comparados aos dos demais trabalhos, isso porque essas amostras provavelmente sofreram algum tipo de deformação plástica logo após a sua fabricação.

Tabela 5 - Propriedades Mecânicas AISI 304

AISI	Limite de resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento 50mm (%)	Dureza (HBR)	Fonte
304	580	290	55	80	ASM (1988)
304	590	300	60	-	Chiaverini (2008)
304	650	300	54	84	América (2015)
304	579	290	55	80	Paredes (2020)
304	650	310	58	-	Machado (2017)
304	770	276	57	-	Gonzalez et al. (2003)
304	586	242	65	-	Huang et al. (2019)
304	573	260	59,7	-	Hayashi (1995)
304	586	242	65	-	Bai (2014)
304	610	466	107	-	Júnior (2006)

Fonte: Autor

Como os aços inoxidáveis austeníticos não são temperáveis, a melhora na sua dureza e resistência só pode ser obtido através do encruamento, esse processo pode ser feito através dos processos de fabricação de laminação, forjamento, extrusão etc. Diversos trabalhos científicos analisam a mudança das propriedades mediante a conformação a frio desses materiais.

Os trabalhos de Moraes (2010) e Milad et al. (2008) são bem parecidos quanto aos objetivos, ambos avaliam a diferença das propriedades mecânicas de um AISI 304, solubilizado e posteriormente laminado em determinadas taxas de redução. Os resultados para as durezas encontradas estão mostrados na Tabela 6 e o comparativo para o limite de resistência e de escoamento para as amostras somente solubilizadas na tabela 7. Os resultados dos dois

trabalhos convergem entre si quanto ao aspecto de quanto mais deformado o material é, mais resistente ele fica e sua dureza aumenta. Apesar de serem próximos, os valores se diferem entre si por conta da diferença da temperatura e tempo de austenitização no qual o material é submetido. O maior tempo e maior temperatura em que o AISI 304 é exposto no trabalho de Milad (2008), faz com que o carbono e os elementos presentes possam se dissolver melhor na austenita, fazendo com que assim apresente maior dureza.

Tabela 6 - Dureza (HV) em função do % de redução

Fonte	Dureza Vickers (HV)	
	Morais (2010)	Milad et al. (2008)
Redução (%)	Solubilização a 1050° por 30 min e resfriamento em água	Solubilização a 1100° por 90 min e resfriamento em água
0	170	188
10	191	251
20	264	305
30	278	336

Fonte: Autor

Tabela 7 - Propriedades mecânicas AISI 304 somente solubilizado

Limite de resistência (MPa)		Limite de escoamento (MPa)		LR/LE	
Morais (2010)	Milad et al. (2008)	Morais (2010)	Milad et al. (2008)	Morais (2010)	Milad et al. (2008)
635	579	213	258	2,9	3,08

Fonte: Autor

O trabalho de Milad et al. (2008) também quantificou os valores de resistência a tração e limite de escoamento de acordo com as taxas de redução realizadas no processo de laminação. Quando esses valores comparados com os mesmos dados disponibilizados pela ASM (1998), eles são próximos entre si. Os resultados encontrados por Milad et al (2008) são maiores, isso porque devido as amostras passaram mais tempo na temperatura de austenitização, o que permite a boa dissolução dos carbonetos, formando uma estrutura mais homogênea. A

temperatura e tempo de austentização não são informados pela ASM referente aos resultados obtidos. Os valores podem ser consultados na Tabela 8.

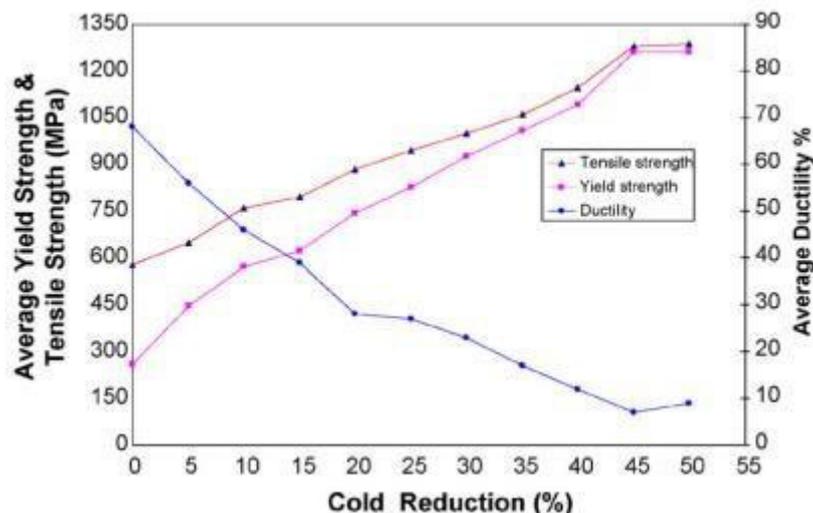
Tabela 8 - Propriedades mecânicas AISI 304 em função do % de redução à frio

Redução (%)	Limite de resistência (MPa)		Limite de escoamento (MPa)	
	ASM (1998)	Milad et al. (2008)	ASM (1998)	Milad et al. (2008)
0	595	579	225	258
10	675	758	483	570
20	780	884	663	743
30	904	1000	817	926
40	1005	1047	981	1093
50	1091	1285	1000	1260

Fonte: Autor

Júnior (2016), Milad et al. (2008) e Morais (2010) concordam entre si que o aumento das propriedades de resistência e dureza do AISI 304 aumentam com a deformação devido à dois fatores: o encruamento do material com surgimento de novas discordâncias internas e a formação de martensita residual induzida pela deformação à frio da austenita. A Figura 19 ilustra a variação das propriedades mecânicas conforme a redução a frio que o material é submetido.

Figura 19 - Propriedades mecânicas AISI 304 em função do % de redução à frio



Fonte: Milad (2008)

No que se refere a melhoria das propriedades mecânicas para os aços inoxidáveis austeníticos em geral, as mesmas ainda podem ser alteradas mediante aos tratamentos de envelhecimento e tratamentos termoquímicos também. As variáveis dos

tratamentos devem ser estipuladas antes mediante as propriedades que se deseja alcançar para a aplicação requerida.

5.1.3 Aplicações

Diante das propriedades mecânicas citadas anteriormente e da microestrutura apresenta, as boas propriedades de resistência e ductilidade, fazem com que esses aços tenham bom desempenho de estampagem, laminação, extrusão e dobra. Por isso, esses aços são comumente empregados na fabricação de pequenos utensílios domésticos, como colheres, talheres e panelas (ASM, 1998).

Segundo Carbó (2012) e Chiaverini (2008), o AISI 304 possui boa soldabilidade e resistência a corrosão, sendo imune a produtos químicos, esterilizantes, ácidos, corantes e substâncias produzidas por alimentos. Devido a isso eles são comumente utilizados em tanques para transporte de produtos (alimentícios e químicos), equipamentos para laticínios, equipamentos para manuseio de produtos químicos e equipamentos das indústrias de bebidas, frigoríficas, petroquímicas, de celulose, bebidas e farmacêuticas.

5.2 Aço Inoxidável Ferrítico AISI 430

O aço inoxidável austenítico AISI 430 é o mais popular e mais utilizado entre os aços inoxidáveis, esse material possui a seguinte composição química, como mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição química AISI 430

AISI	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %
430	0,12 (max)	1,00 (máx)	1,00 (máx)	0,04 (máx)	0,03 (máx)	16,00 – 18,00	-	-

Fonte: ASM (1988)

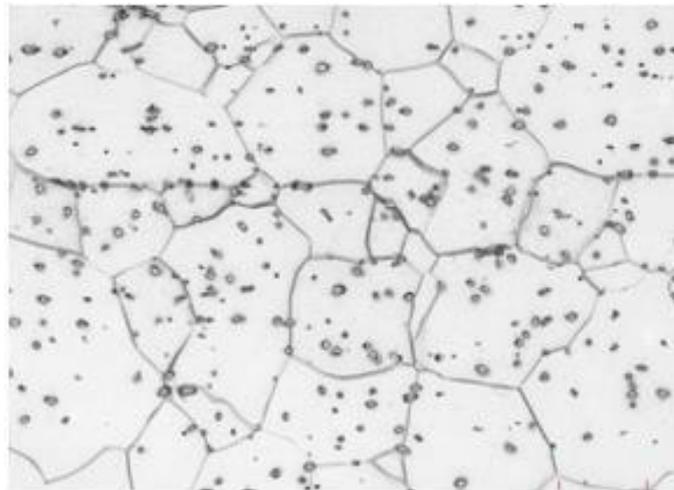
5.2.1 Microestrutura

Após passar por todo o seu estado de processamento nas aciarias, a microestrutura final dos AISI 430 é composta por uma matriz ferrítica, de estrutura cristalina

CCC com grãos equiaxiais com carbonetos de cromo precipitados e distribuídos uniformemente pela a matriz. Essa microestrutura é resultante do tratamento final de recozimento que esses aços são submetidos, pois durante o seu processo de laminação pode ocorrer a formação de martensita devido ao resfriamento e o material apresentar uma estrutura composta por ferrita e martensita, o que não é favorável as suas propriedades mecânicas (COSTA E SILVA, 1988; MCGUIRE, 2008).

Essa microestrutura resultante do tratamento final de recozimento que esses aços sofrem é constada nos trabalhos de Alizadeh-Sh e Pouranvari (2014), Lu et al. (2019), Ferreira (2005) e Steudel (2018) conforme pode ser verificado na Figura 20.

Figura 20 - Micrografia AISI 430 como recebido



Fonte: Adaptado de Ferreira (2005)

5.2.2 Propriedades Mecânicas

Segundo McGuire (2018), o AISI 430 possui comportamento mecânico bem similar aos dos aços carbono. Em geral, os AISI são conhecidos por possuírem boa ductibilidade após passarem pelo tratamento de recozimento para obtenção de boas propriedades.

Na Tabela 10 abaixo, são colocados em comparação alguns resultados de propriedades mecânicas dos AISI 430, no estado como recebido de produção. Nota-se que em sete fontes diferentes, os resultados são bastante parecidos entre si. Tomando como referência os valores de ASM (1998) e Chiaverini (2008), que descrevem em suas obras que esses são os resultados para uma amostra de AISI 430 no estado como recebido, evidencia-se que os outros

trabalhos também estavam trabalhando com amostra como recebida que passou por tratamentofinal de recozimento, pois os valores são bastante semelhantes entre si.

As diferenças podem se dar devido a pequenas diferenças da composiçãoquímica real de cada amostra e também devido a pequenas diferenças experimentais no momento de realização do ensaio. Os valores que mais se destoam dos demais é o de limite deescoamento, encontrado no trabalho de Alencar et al. (2017) e os alongamentos de Ferreira (2005), Cândido (2003) e Silva (2012), que saem dos limites estabelecidos por Chiaverini (2008).

Tabela 10 – Propriedades mecânicas AISI 430

AISI	Limite de resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento 50mm (%)	Dureza (HBR)	Fonte
430	517	345	25	85	ASM (1998)
430	520	350	30	81	America (2015)
430	415-620	350	20-35	70-86	Chiaverini (2008)
430	517	345	25	85	Paredes (2020)
430	490	330	33	-	Alizadeh-Sh (2014)
430	483	349	19	72	Ferreira (2005)
430	425	279	24	-	Alencar et al. (2017)
430	494	320	28	-	Ferrinari (2004)
430	518,4	361,9	17,62	-	Cândido (2003)
430	514,8	334,5	-	-	Studel (2018)
430	525,8	358	18,5	-	Silva (2012)

Fonte: Autor

5.2.3 Aplicações

As propriedades mecânicas dos AISI 430, ainda que inferiores as do AISI 304, faz com que ele seja bastante utilizado como opção de substituição, já que o seu custo de produção é menor que os dos aços inoxidáveis austeníticos (CARBÓ, 2008).

De acordo com Ferreira (2005), os AISI 430 possuem uma menor estampabilidade do que o AISI 304, mas prevalece quanto a questão do embutimento, por isso é bastante empregado na fabricação de fogões, geladeiras, armários, pias e estruturas/utensílios domésticos que compõe as cozinhas, além também de elementos de decoração e arquitetônicos.

Tanto McGuire (2018), Ferreira (2005) e Studel (2018) concordam em seus trabalhos que os AISI 430 possuem excelentes propriedades de resistências à corrosão em temperatura ambiente e temperaturas mais elevadas, bem como resistentes a ação de ácidos,

cloretos e gases sulfurados. Porém esses materiais não podem ser usados em altas temperaturas próximas a 400°C, pois ocorrem a fragilização devido ao surgimento da fase sigma. A fragilização a 475°C também dificulta bastante a soldabilidade desses materiais, fazendo com que se reduzam as suas aplicações onde é necessário a soldagem.

No geral, os AISI 430 também são usados na indústria química e automobilística.

5.3 Aços Inoxidável Martensítico AISI 420

Os aços inoxidáveis martensíticos AISI 420 possuem a seguinte composição química, como mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 - Composição química AISI 420

AISI	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %
420	0,15 (min)	1,00 (máx)	0,04 (máx)	0,03 (máx)	1,00 (máx)	12,00 – 14,00	0,75	0,50

Fonte: ASM (1998)

5.3.1 Microestrutura

Durante a produção dos aços inoxidáveis martensíticos, após o processo de laminação no campo austenítico, ocorre a formação de martensita devido à alta temperabilidade. Por isso, posteriormente após a laminação eles passam por o processo de recozimento para promover alívio de tensões e revenimento também (ANDERLE, 2013).

Na Figura 21, pode notar-se na micrografia da amostra como recebida diretamente do processo de fabricação, a microestrutura do AISI 420, composta por uma matriz ferrítica e carbonetos de cromo $M_{23}C_6$ dispersos nessa matriz (ALCÂNTARA, 2021; FALCÃO, 2011).

Figura 21 - Micrografia AISI 420 como recebido

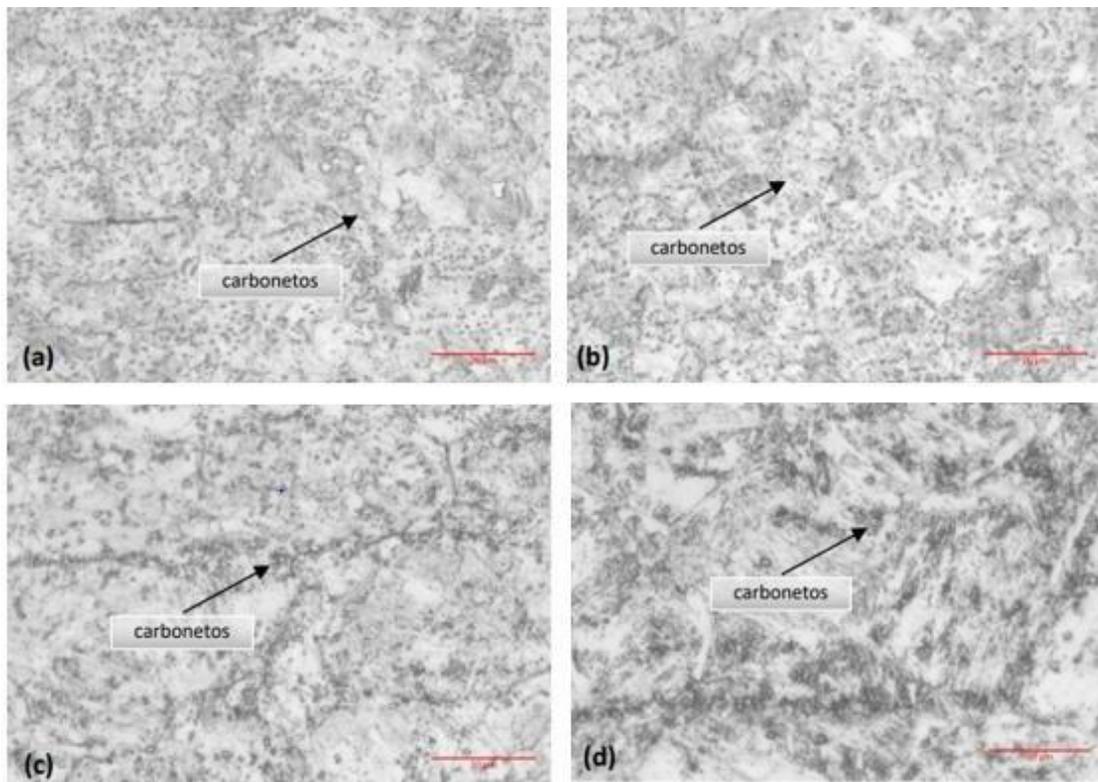


Fonte: Adaptado de Alcântara (2021)

Quando se deseja obter uma matriz martensítica de maior dureza, esses aços devem ser submetidos ao tratamento de têmpera. Ao observamos a figura x, notamos que ao serem resfriados a partir de uma determinada temperatura de austenitização, os aços apresentam uma microestrutura final de martensita com alguns carbonetos de cromo esferoidizados dispersos na matriz.

Em seus trabalhos, Alcântara (2021), Scheuer, et al (2014) e Lima (2019) concordam quanto ao resultado observado de que quanto maior a temperatura de austenitização, maior o tamanho de grão da austenita e maior a dissolução dos carbonetos de cromo na fase, fazendo com que a microestrutura final apresente uma martensita com grãos mais refinados e quantidade menor de carbeto presentes. Se na composição do aço em questão, ele apresentar um teor de carbono o mais próximo possível do mínimo requerido para os AISI 420, esses carbonetos tendem a sumir totalmente a partir da temperatura de austenitização de 1050°C. A Figura 22 a microestrutura do AISI 420 que foi austenitizado nas temperaturas de 950°C (a), 1000°C (b), 1050°C (c) e 1110°C (d).

Figura 22 - Micrografia AISI 420 temperado e austenitizado a partir das temperaturas de 950°C (a), 1000°C (b), 1050°C (c) e 1100°C (d)



Fonte: Alcântara (2021)

5.3.2 Propriedades Mecânicas

Por possuírem quantidade considerável de cromo em sua composição, os AISI 420 possuem boa temperabilidade e logo formam estrutura martensítica quando resfriados rapidamente. A estrutura martensítica é responsável pela alta dureza e fragilidade desses materiais. Para contornar essas propriedades, comumente em seu processo de produção esses aços passam por tratamentos térmicos posteriores para aliviar as tensões internas e melhorar as propriedades mecânicas.

A Tabela 12, reúne as propriedades mecânicas do AISI 420 considerando o material no estado como recebido de fábrica. Ao observar os resultados das diferentes fontes, notamos que todos os valores quantitativos para as respectivas propriedades são bastante semelhantes entre si. Os valores mais discrepantes entre si podem ser observados no limite de resistência a tração fornecido pela Aperam (2015) e no limite de escoamento fornecido por

Falcão (2011), isso pode ser devido a pequenas diferenças de composição dos aços usados e diferenças nos procedimentos experimentais.

Tabela 12 - Propriedades mecânicas AISI 420 como recebido

AISI	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento 50mm (%)	Dureza (HBR)	Fonte
420	655	345	20	92	ASM (1988)
420	620	370	26	87	America (2015)
420	670	350	25	-	Costa e Silva (1988)
420	655	345	25	82	Paredes (2020)
420	671	314	28	-	Falcão (2011)

Fonte: Autor

Como o AISI 420 costumam passar pelos tratamentos térmicos de revenimento após fabricação para melhorar suas propriedades mecânicas, foram reunidos em duas tabelas os principais resultados encontrados das propriedades mecânicas para diferentes condições de tratamento e temperaturas de seis trabalhos diferentes. Esses trabalhos foram enumerados de 1 a 6 para melhor visualização e questão estética ao serem inseridos nas tabelas, sendo dessa forma o trabalho de Alcântara (2021): enumerado de 1; Isfahany, Saghafian e Borhani (2011): 2; Scheuer et al. (2014): 3; Falcão (2022): 4; Lupyr et al. (2002): 5 e Lima (2019): 6.

As Tabela 13 mostra os valores encontrados para as durezas, já a Tabela 14 mostra os resultados encontrados para o limite de resistência a tração e limite de escoamento. Os espaços em brancos significam que as literaturas em questão não avaliaram as propriedades para determinadas condições.

Observando a Tabela 13, para as amostras que sofreram somente tempera, a dureza aumenta de acordo com o aumento da temperatura de austenitização, isso pode ser explicado porque o cromo e o carbono se dissolvem mais na austenita, resultado na supersaturação de carbono na martensita formada durante a têmpera, isso pode ser observado para os resultados das seis literaturas avaliadas (SCHEUER et al., 2014).

Para Alcântara (2021), Isfahany (2014) e Lima (2019), os valores de dureza encontrados para as respectivas temperaturas de revenimento são bastante próximas, confirmando o efeito de que a dureza se reduz de acordo com o aumento da temperatura de revenimento. Isso se ocorre devido a precipitação de carbonetos nos contornos de grãos, primeiro os carbonetos se precipitam na forma M_7C_3 e depois se transformam em $M_{23}C_6$. Esse

fenômeno também é conhecido como dureza secundária. A redução da dureza também é acompanhada de redução na resistência a corrosão e as propriedades de ductilidade e tenacidade melhoram (ISFAHANY; SAGHAFIAN; BORHANI, 2011).

Para os trabalhos que analisaram ensaios de durezas, os resultados convergem entre si, seguindo a mesma tendência de apresentarem durezas maiores de acordo com o aumento da temperatura de austenitização e diminuïrem de acordo com o aumento da faixa de temperatura de revenimento. Além dos valores numéricos serem bastante próximos entre si. As pequenas diferenças podem ser explicadas devido a diferença no teor de carbono presente nas amostras usadas para suas análises.

Tabela 13- Valores de dureza AISI 420 para várias condições de austenitização e revenimento

Temperatura de austenitização (°C)	Tratamento	Dureza Hockwell (HRC)				Dureza Vickers (HV)		
		1	2	5	6	3	4	6
900 - 950	Têmpera	42,5	-	41,7	46,2	430	-	460
	Revenimento 200°C - 300°C	43,5	48	40		-	-	-
	Revenimento 400°C - 500°C	43	-	37	43,5	374,5	-	429
	Revenimento 600°C - 700°C	-	-	21,5	28	-	-	294
980 - 1015	Têmpera	51	48	-	-	470	599	-
	Revenimento 200°C - 300°C	46	-	-	-	-	540	-
	Revenimento 400°C - 500°C	45,5	-	-	-	381,3	512	-
	Revenimento 600°C - 700°C	-	-	-	-	-	383	-
1050 - 1100	Têmpera	53	49	-	51	512,5	-	531
	Revenimento 200°C - 300°C	50	48,5	-	-	-	-	-

Revenimento 400°C - 500°C	50	48	-	46,6	395,8	-	446,3
Revenimento 600°C - 700°C	-	28,5	-	29,4	-	-	310,6

Fonte: Autor

Na Tabela 14 podemos notar a melhora no limite de resistência a tração e escoamento de acordo com o aumento da temperatura de austenitização devido a melhor dissolução do carbono e do cromo, conforme confirmado na literatura de Lupry et al. (2020). Nas temperaturas de revenimento de 200°C a 500°C essas propriedades pouco sofrem alterações. Um ponto interessante a ser observado com mais atenção é redução das mesmas no revenimento de 700°C, causada novamente pela precipitação de carbonetos e o material adquire boas propriedades de ductilidade, em contrapartida sua resistência diminui. Os valores não são precisamente iguais, mas os resultados dos trabalhos são confirmados também nas literaturas da ASM (1998) e de Costa e Silva (1988), onde o aumento da temperatura de revenimento é acompanhado na redução da resistência e dureza.

Tabela 14 - Limite de resistência à tração e limite de resistência ao escoamento AISI 420 para várias condições de austenitização e revenido

Temperatura de austenitização (°C)	Tratamento	Limite de resistência a tração (MPa)			Limite de escoamento (Mpa)		
		1	2	5	1	2	5
900 - 950	Têmpera	1490	-	-	1080	-	-
	Revenimento 200°C - 300°C	1425	-	-	1190	-	-
	Revenimento 400°C - 500°C	1420	-	-	1195	-	-
	Revenimento 600°C - 700°C	-	-	755	-	-	586
980 - 1015	Têmpera	1800	-	-	1410	-	-
	Revenimento 200°C - 300°C	1770	-	-	1370	-	-
	Revenimento 400°C - 500°C	1770	-	-	1395	-	-

1050 - 1100	Revenimento 600°C -700°C	-	-	751	-	-	572
	Têmpera	1810	-	-	1420	-	-
	Revenimento 200°C - 300°C	1780	1800	-	1370	1370	-
	Revenimento 400°C - 500°C	1760	1680	-	1410	1350	-
	Revenimento 600°C -700°C	-	1050	-	-	725	-

Fonte: Autor

5.3.3 Aplicações

Para Falcão (2011), Alcântara (2021) e Chiaverini (2008) devido à alta dureza, esses materiais são usados em aplicações que necessitam de boa resistência ao desgaste como lâmina de corte de utensílios domésticos, de equipamentos industriais e ferramentas de corte propriamente ditas. Pela boa resistência a corrosão quando no estado martensítico e novamente sua dureza, os AISI 420 são usados também em equipamentos cirúrgicos e implantes dentários, apresentado alta durabilidade e não causando reações adversas ao corpo humano. No setor automobilístico, os AISI 420 podem ser aplicados em discos de freio, válvulas, parafusos e buchas.

5.4 AISI 304 X AISI 430 AISI 420

5.4.1 Microestruturas

Diante dos resultados apresentados anteriormente, considerando as amostras no estado como recebido, os aços AISI 420 e AISI 430 possuem as microestruturas iguais, sendo constituídas por uma matriz ferrítica com grãos equiaxiais e carbonetos de cromo dispersos nessa matriz, conforme é mostrado nas Figuras 20 e 21. O AISI 430 possui essa microestrutura originária devido a sua própria composição química e a forma de processamento. Já o AISI 420, ao ser processado nas aciarias, forma microestrutura martensítica no processo de lingotamento devido sua alta temperabilidade e posteriormente é submetido a um revenimento, onde a martensita se decompõe em ferrita, dando origem a microestrutura ferrítica com carbonetos de cromo.

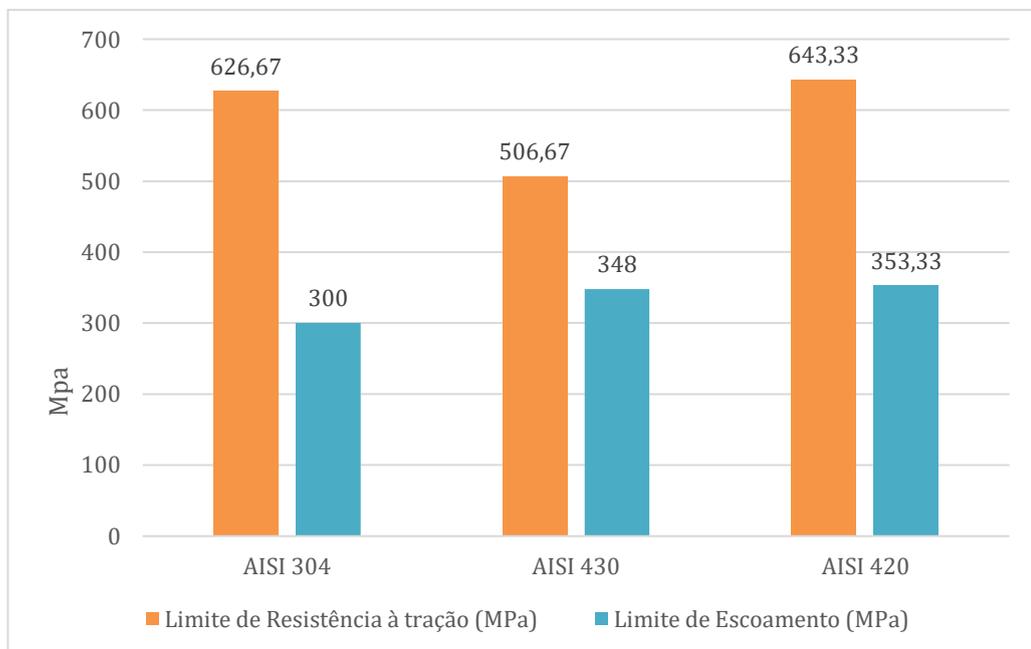
A microestrutura do AISI 304 é resultado de sua própria composição química

também, por não ser temperável por tratamento, ao ser resfriado, mesmo que rapidamente, apresenta austenita à temperatura ambiente.

5.4.2 Propriedades Mecânicas

O gráfico abaixo representa os valores médios dos limites de resistência à tração e limites de resistência de escoamento dos AISI 304, AISI 430 e AISI 420 no estado de como recebido, que foram tabelados anteriormente. Notamos que o AISI 430 realmente possui o limite de escoamento maior que o do AISI 304, conforme mencionado por McGuire (2008) e o AISI 420 possui os melhores valores de resistência mecânica.

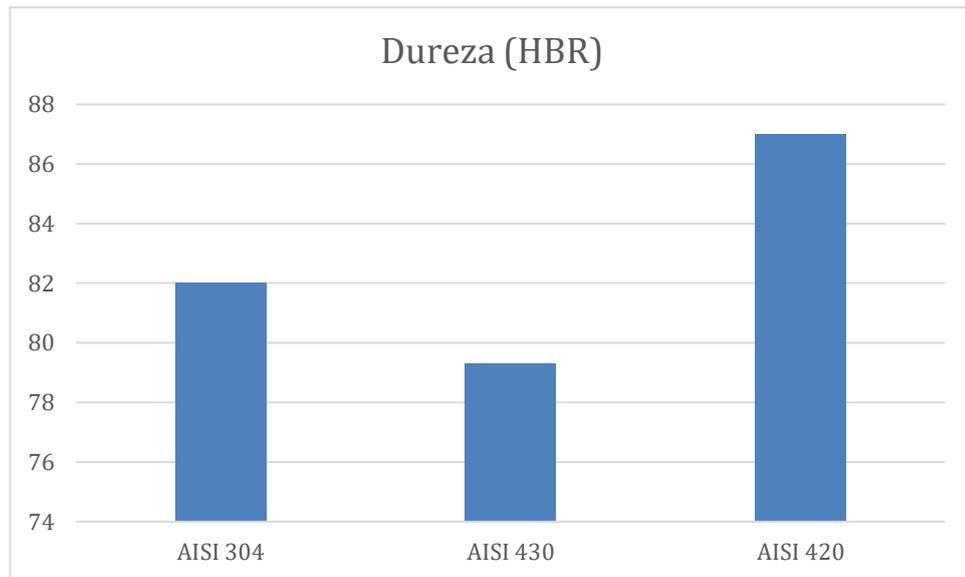
Gráfico 1 - Valores médios de Limite de resistência à tração e escoamento para AISI 304, AISI 430 e AISI 420



Fonte: Autor

Para os valores médios de dureza encontrados no Gráfico 2, temos que o AISI 420 é mais duro. Isso devido a sua composição química e alta temperabilidade, podendo formar facilmente martensita, que é o microconstituente mais duro ue os outros.

Gráfico 2 - Valores médios de Dureza (HBR) AISI 304, AISI 430 e AISI 420



Fonte: Autor

6 CONCLUSÕES

A partir de todos os resultados consultados, compreendidos e comparados a respeito das propriedades mecânicas e das microestruturas dos aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos podemos inferir os seguintes pontos:

- Os procedimentos de tratamentos térmicos são fundamentais para a manutenção das propriedades mecânicas que se desejam obter nos aços inoxidáveis e devem ser realizados com bastante precisão.
- Qualquer mínimo parâmetro de temperatura, tempo e velocidade de resfriamento de um tratamento térmico que seja alterado, pode resultar em grandes diferenças nas propriedades mecânicas e na microestrutura dos aços inoxidáveis.
- A composição química é um grande fator responsável pelas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis.
- A maioria dos aços inoxidáveis são vendidos comercialmente após passarem pelo tratamento térmico de recozimento ou revenimento, por isso os AISI 304, 430 e 420 possuem valores para as suas propriedades distintos, mas a diferença quantitativa entre eles não é tão exorbitante.
- No estado comercializado, os AISI 420 e AISI 430 possuem a mesma microestrutura, o que os diferem um pouco entre si nas suas propriedades mecânicas é a composição química do material.
- Considerando os AISI 304, 420 e 430 em seu estado como recebidos, o AISI 420 possui melhor resistência do que o AISI 430 e por último o AISI 304. Provavelmente isso por contato do % de carbono presente na liga, que é bem maior quando comparada aos dos outros. Levando em consideração as propriedades de ductilidade e tenacidade, a ordem é inversa.
- O AISI 430 possui melhor limite de escoamento que o AISI 304.
- Os resultados comparados no trabalho foram bem coerentes, as diferenças se deram provavelmente a composição química de cada aço usado.
- Na literatura foi encontrado diversos artigos que abordavam os aços do estudo das mais diversas formas quanto a tratamentos e soldagem, por isso houve demora na leitura e seleção de informações que iriam entrar no presente trabalho de curso.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realizar o estudo comparativo lendo em consideração as propriedades corrosivas do material.
- Realizar ensaios com amostras de AISI 304, 420 e 430 para comparar com os resultados já difundidos na literatura.

8 REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, C. M. DE. RELAÇÃO ESTRUTURA-PROPRIEDADES-PROCESSAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.
- ALENCAR, R. A. F. DE et al. Efeito De Mudanças Sucessivas Na Trajetória De Deformação No Comportamento Mecânico Do Aço Inoxidável Aisi 430. p. 1007–1013, 2017.
- ALIZADEH-SH, M.; MARASHI, S. P. H.; POURANVARI, M. Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties. *Materials and Design*, v. 56, p. 258–263, 2014.
- AMERICA, A. S. Especificações Técnicas Acabamento Superficial Aço inoxidável e desenvolvimento sustentável., 2015. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/produtos/biblioteca-tecnica/> Acesso em: 12 dez. 2021.
- ANDERLE, C. A. N. EFEITO DOS PARÂMETROS DE REVENIDO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420 EFEITO DOS PARÂMETROS DE REVENIDO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
- ASM, A. S. F. M. *Metals Handbook*. 1998.
- ASM, A. S. F. M. *Engineering properties of steel*.
- BAI, Y. et al. Improvement of fatigue properties in type 304 stainless steel by annealing treatment in nitrogen gas. *Materials Science and Engineering A*, v. 607, p. 578–588, 2014.
- CALLISTER, R. *Ciência e Engenharia de Materiais*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CÂNDIDO, F. S. ORIGENS DO ESTRIAMENTO DE ESTAMPAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS TIPO AISI 430. [s.l.] Instituto Militar de Engenharia, 2003.
- CARBÓ, H. *Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações*. Arcelor Mittal, p. 29, 2008.
- CHIAVERINI, V. *Aços Ferros Fundidos*. 6. ed.
- COLPAERT, H. *METALOGRAFIA -DOS PRODUTOS SIDERÚRGICOS COMUNS-* COLPAERT - Cópia.compressed.pdf. 4. ed.
- COSTA E SILVA, M. *Aços e Ligas Especiais*. 2. ed.
- CRUZ, Benhur Demetrius de Oliveira. Tipos de aço. [S. l.], 4 jan. 2012. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/BenhurDemetrius/tipo-de-aos>. Acesso em: 11 dez. 2021
- FALCÃO, C. Estudo do comportamento da fadiga de baixo ciclo em altas temperaturas do aço inoxidável AISI 420. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos, 2002.
- FERRARINI, J. L. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais- PPGEM Caracterização de materiais para o processo de Estampagem. [s.l: s.n.].
- FERREIRA, J. S. EFEITO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE MARTENSITA, FORMADA NO RESFRIAMENTO APÓS RECOZIMENTO INTERCRÍTICO, NO GRAU DE ESTRIAMENTO, PROPRIEDADES MECÂNICAS E ESTAMPABILIDADE DE UM AÇO TIPO AISI 430. [s.l: s.n.].
- GONZALEZ, B. M. et al. The influence of copper addition on the formability of AISI 304 stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 343, n. 1–2, p. 51–56, 2003.

HAYASHI, M. Thermal fatigue strength of type 304 stainless steel in simulated BWR environment. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, v. 306, p. 71–78, 1995.

HUANG, W. et al. Mechanical properties of 304 austenite stainless steel manufactured by laser metal deposition. Materials Science and Engineering A, v. 758, n. May, p. 60–70, 2019.

INFOMET: Aços e ligas. Disponível em < <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligasconteudo-ler.php?codConteudo=103>>. Acesso: 10 jan. 2022