



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

**BRUNO RIBEIRO PINHEIRO**

**ESTUDOS SOBRE ADIÇÃO DE ELEMENTOS DE LIGA E DO TRATAMENTO  
TÉRMICO DE SOLUBILIZAÇÃO PARA MELHORAR AS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS E DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS AISI 304  
SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS – UMA REVISÃO DE  
LITERATURA**

**FORTALEZA**

**2020**

BRUNO RIBEIRO PINHEIRO

ESTUDO SOBRE ADIÇÃO DE ELEMENTOS DE LIGA E DO TRATAMENTO  
TÉRMICO DE SOLUBILIZAÇÃO PARA MELHORAR AS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS E DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS AISI 304 SUBMETIDOS  
A ELEVADAS TEMPERATURAS – 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 a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva

FORTALEZA

2020

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)

---

- P718e Pinheiro, Bruno Ribeiro.  
Estudo sobre adição de elementos de liga e do tratamento térmico de solubilização para melhorar as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão dos aços AISI 304 submetidos a elevadas temperaturas - uma revisão de literatura / Bruno Ribeiro Pinheiro. – 2021.  
62 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.
1. Aços inoxidáveis austeníticos. 2. Aço AISI 304. 3. Solubilização. 4. Corrosão. I. Título.
- CDD 669
-

BRUNO RIBEIRO PINHEIRO

ESTUDO SOBRE ADIÇÃO DE ELEMENTOS DE LIGA E DO TRATAMENTO  
TÉRMICO DE SOLUBILIZAÇÃO PARA MELHORAR AS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS E DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS AISI 304 SUBMETIDOS  
A ELEVADAS TEMPERATURAS – 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 de Silva (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

---

Prof. Dr. Juan Manuel Pardal  
Universidade Federal do Ceará (UFF)

A Deus.

Aos meus pais, Antônio e Aleuda.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por toda força que Nele encontrei e por tudo que conquisei.

Aos meus pais, Antônio Pinheiro e Aleuda Ribeiro, por toda união, apoio e educação que me deram, moldando a pessoa que sou hoje.

A minha querida irmã Aline Pinheiro, pelo exemplo e apoio que me deu.

A minha namorada Izadora Piegas, por todo apoio, compreensão e carinho em todo esse período.

Ao Professor e Orientador Dr. Marcelo José Gomes da Silva, pela excelente orientação e por auxiliar no meu crescimento técnico nesse trabalho.

Ao Professor Dr. Jorge Luiz Cardoso, por toda paciência, disciplina e ajuda no meu desenvolvimento técnico.

Aos amigos de longa data, Matheus Pimentel, Daniel Secundino, Jhonatta Teles e Thiago Linhares, que acompanharam toda minha trajetória até esse momento.

Aos meus amigos da UFC, em especial a Beatriz Sousa, Karine Pereira, Gilvania Pinheiro e Eric Fortunato, que estiveram comigo em todos os momentos na faculdade, apoiando e proporcionando momentos incríveis dentro e fora do ambiente acadêmico.

Aos meus amigos de faculdade, Matheus Souza, Lucas Gomes, Daniel Souza, Cesanildo, Bruno Matos, Pablo Pereira, Francisco Henry, Bruno Colares, Victória Barroso e Higor Andrade por todos os momentos descontraídos e de experiências compartilhadas que tornaram essa jornada mais agradável.

Ao Professor Dr. Marcelo Mota, pela maneira que contribuiu para o meu desenvolvimento no curso desde a sala de aula, além do PET e do LPTS, sempre com atenção, respeito e paciência.

Ao Secretário do curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Antônio Bandeira, por toda ajuda oferecida durante minha graduação.

Aos grandes amigos Francisco Neto, Anderson Pereira, Paulo Sena, Luciano Cavalcante, Weriton e Carlos Cruz por todo apoio que me deram nesse último ano, experiências compartilhadas e companherismo.

Ao meu ex time de colegas de trabalho na Raízen Combustíveis, que foram essenciais para a minha formação profissional, além de toda a experiência compartilhada.

A todos os professores da UFC que contribuíram compartilhando os seus conhecimentos possibilitando a minha evolução intelectual, colaborando para a minha formação.

“A paciência é um elemento fundamental do sucesso.” (Bill Gates)

## RESUMO

Os aços inoxidáveis austeníticos consistem em ligas metálicas com boas propriedades mecânicas e de alta resistência à corrosão. Nessa família, tem-se os aços da série 300, em particular, o AISI 304L, caracterizado por sua resistência à corrosão e sua aplicabilidade para serviços em temperaturas elevadas no segmento de petróleo e gás natural. O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo exploratório sobre o comportamento de alguns aços dessa série quanto a adição de elementos de liga e aos tratamentos térmicos como uma ferramenta para melhorar as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão do aço AISI 304. Foram selecionados 3 artigos que tenham como fundamento o estudo dos efeitos térmicos aplicados a esses aços e dos fenômenos de corrosão que estão submetidos, além de livros que abordam a temática e dissertações que continham uma abordagem científica que enriquecesse o estudo desenvolvido. Com base na literatura, pode ser constatado que a adição de elementos de liga e o tratamento térmico de solubilização promove no metal uma elevada resistência à corrosão, porém condições específicas de temperatura e de pH podem prejudicar essa propriedade. Desse modo, as análises realizadas contribuiriam para evidenciar que o comportamento do material fosse previsto quando submetido a serviços que exigem elevadas temperaturas e no como o tratamento térmico é eficaz para otimizar as propriedades desses aços durante a sua produção, porém aços como o AISI 444, equiparando-os ao aço inoxidável AISI 304L, possui propriedades de resistência à corrosão melhores quando submetido a uma mesma condição de aplicação dos aços AISI 304L e 316L, tornando-o viável como alternativa aos outros aços.

**Palavras-chave:** Aços inoxidáveis austeníticos. Aço AISI 304. Solubilização. Corrosão.

## ABSTRACT

Austenitic stainless steels consist of metal alloys with good mechanical properties and high resistance to corrosion. In this family, there are the steels of the 300 series, in particular, the AISI 304L, characterized by its resistance to corrosion and its applicability for high temperature services in the petroleum and natural gas segment. The present work aims to carry out an exploratory study on the behavior of some steels in this series regarding the addition of alloy elements and heat treatments as a tool to improve the mechanical properties and corrosion resistance of AISI 304 steel. 3 articles based on the study of the thermal effects applied to these steels and the corrosion phenomena they are submitted to, as well as books that address the theme and dissertations that contained a scientific approach that enriched the developed study. Based on the literature, it can be seen that the addition of alloying elements and the solubilization heat treatment promotes a high resistance to corrosion in the metal, however specific conditions of temperature and pH can impair this property. Thus, the analyzes performed contributed to show that the behavior of the material was predicted when subjected to services that require high temperatures and how the heat treatment is effective to optimize the properties of these steels during their production, however steels such as AISI 444, equating them to AISI 304L stainless steel, it has better corrosion resistance properties when subjected to the same application condition as AISI 304L and 316L steels, making it viable as an alternative to other steels.

**Keywords:** Austenitic stainless steel. Steel AISI 304. Solution annealing. Corrosion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Passividade dos aços-cromo quando submetidos a uma atmosfera industrial durante 10 anos.....	7
Figura 2	– Gráfico ilustrando a resistência dos aços à oxidação a altas temperaturas com base no teor de cromo, estimando para tubos de 1/2" aquecidos por 48 horas a 1000°C ao ar.....	17
Figura 3	– Diagrama de Schaeffler para aços inoxidáveis.....	19
Figura 4	– Aços inoxidáveis e suas principais faixas de composições químicas e propriedades mecânicas.....	21
Figura 5	– Fluxograma com as principais variações a partir do aço inoxidável austenítico AISI 304.....	23
Figura 6	– Diagrama Isotérmico para uma liga Fe-Cr-Ni a 750°C.....	24
Figura 7	– Diagrama binário de equilíbrio Fe-Cr.....	25
Figura 8	– Diagrama de fase ternário Fe-Cr-Ni para diferentes secções isotérmicas: (a) 1400°C, (b) 1100°C, (c) 650°C.....	26
Figura 9	– Modos de solidificação conforme secção do diagrama de fases Fe-Ni-Cr à 70% Fe.....	27
Figura 10	– Esquemático dos diferentes tipos de solidificação.....	29
Figura 11	– Diagrama de Schaeffler.....	31
Figura 12	– Ciclo dos Metais.....	33
Figura 13	– Sensitização nos contornos de grão em aço inoxidável austenítico.....	35
Figura 14	– Típicas variações de pites em superfícies de materiais metálicos.....	38
Figura 15	– Ciclos térmicos de solubilização e estabilização.....	41
Figura 16	– Potencial de corrosão médio dos aços AISI 304L, AISI 316L e AISI 444 para condições impostas.....	46

- Figura 17 – Potencial médio de corrosão localizada (por pite) dos aços inoxidáveis AISI 304L, AISI 316L e AISI 444L para todas as condições impostas.....47
- Figura 18 – Cargas de fratura das películas passivas versus concentração de ferro nas películas. A liga AISI 316 é visivelmente mais fraca do que as outras.....48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Diferentes tipos de solidificação.....	27
Tabela 2	– Série de Potenciais de Eletrodo Padrão.....	36
Tabela 3	– Faixas de temperaturas para tratamento de solubilização em alguns aços inoxidáveis austeníticos.....	40
Tabela 4	– Faixa de temperatura de sensitização para alguns aços inoxidáveis austeníticos.....	42
Tabela 5	– Revisão dos estudos sobre aços inoxidáveis utilizados nesse trabalho e tipo de método para coleta de dados.....	47

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	15
2.1	Objetivo Geral.....	15
2.2	Objetivo Específico.....	15
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
3.1	Aços Inoxidáveis.....	16
3.2	Diagrama de Fases.....	24
3.3	Processo de Solidificação.....	26
3.3.1	Tipo A: Solidificação austenítica.....	27
3.3.2	Tipo B: Solidificação austenítica-ferrítica.....	28
3.3.3	Tipo C: Solidificação.....	28
3.3.4	Tipo D: Solidificação ferrítica.....	28
3.3.5	Influência da composição química na solidificação.....	29
3.3.6	Influência da velocidade de resfriamento.....	32
3.4	Corrosão.....	33
3.4.1	Definição.....	33
3.4.2	Corrosão Intergranular.....	34
3.4.3	Abordagens sobre outros principais tipos de corrosão.....	35
	a) Corrosão Generalizada .....	35
	b) Corrosão Localizada.....	35
	c) Corrosão Galvânica.....	36
	d) Corrosão em frestas.....	37
	e) Corrosão por pites.....	37
3.5	Tratamentos Térmicos.....	38
3.5.1	Solubilização.....	38
3.5.2	Estabilização.....	40
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	43
4.1	Tipo de Estudo.....	43
4.1.1	1ª Etapa: Fontes.....	43
4.1.2	2ª Etapa: Coleta de Informações e Dados.....	44
4.1.3	3ª Etapa: Análise e Interpretação dos Resultados.....	44

4.1.4	4ª Etapa: Discussão dos Resultados.....	44
5	<b>ASPECTOS ÉTICOS.....</b>	45
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	46
7	<b>CONCLUSÃO.....</b>	55
7.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	56
8	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	57

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem propriedades boas o suficiente para atenderem a necessidade de aplicações que confirmam elevada temperatura ao equipamento, principalmente quando ocorrem em longos ciclos de aplicação, na qual a periodicidade e o tempo que o equipamento se manterá operante são fatores determinantes para o tipo de material que será empregado, como é o caso de trocadores de calor, válvulas de pressão e alívio térmico e aquecedores. Diante disso, os aços inoxidáveis que possuem cromo e níquel na sua composição constituem os melhores tipos de aços em termos de resistência a corrosão (CHAVERINI, 1977), em particular o aço inoxidável austenítico AISI 304L que possui uma vasta finalidade quando se trata de fabricação de válvulas, tubos, equipamentos para a área da saúde, peças para a indústria química, petrolíferas, laticínios, frigorífica, tintas e afins.

Um efeito prejudicial aos aços inoxidáveis austeníticos ocorre com a exposição a elevadas temperaturas, em torno de 450° a 850°C, tornando-o sujeito a corrosão intergranular devido ao fenômeno de sensitização, na qual há formação de carbonetos de cromo, oriundos da combinação do cromo com o carbono livre, precipitados nas regiões de contornos de grãos, formando sítios catódicos em relação a matriz que foi empobrecida em cromo, ocasionando uma corrosão localizada nessa região intergranular (SEDRINKS, 1996).

Os efeitos produzidos pela corrosão nos metais geram prejuízos significativos na indústria, principalmente com gastos em manutenção corretiva, paradas no setor produtivo e, conseqüentemente, comprometimento no rendimento esperado. Usualmente, utiliza-se o aço inoxidável como principal material para equipamentos que requeiram elevada resistência à corrosão e oxidação e, para obter um bom desempenho nessa propriedade, é preciso que o teor de cromo adicionado na liga seja acima de 10,5% para que ocorra a passivação e conseqüente formação de um filme protetor a base de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Essa camada de óxido possui algumas propriedades interessantes que remetem a uma excelente resistência, por exemplo a solubilidade que é praticamente inexistente e baixa porosidade. A estabilidade dessa camada apassivadora é decorrente dos elementos de liga constituintes e ao meio que será submetida e sua dada aplicação.

Essa problemática da corrosão pode gerar perdas econômicas, sejam elas diretas ou indiretas. São consideradas diretas quando promovem custos relacionados à substituição das peças ou dos equipamentos que sofreram corrosão, tal como o custo relacionado à mão-de-obra e a energia. Investimentos que possuam relação com os processos de proteção catódica, recobrimentos, pinturas, dentre outros, também se relacionam como esse tipo de perdas. Enquanto às perdas indiretas, tem-se as paralisações acidentais, redução de eficiência de um dado equipamento, contaminação de produtos e etc. (GENTIL, 1996).

Diante desse contexto, foi analisado nesse trabalho um conjunto de obras; sendo elas livros, artigos científicos, teses, monografias e dentre outras fontes referenciadas a cunho científico e, legitimamente, para um estudo exploratório, para traçar os principais pontos durante a produção de um aço inoxidável austenítico, relacionados com a composição química e tratamentos térmicos que contribuam para problemas que envolvam processos corrosivos nesses aços quando submetidos a condições de trabalho em elevada temperatura. O processo estudado em particular foi a corrosão intergranular e o fenômeno de sensitização nos aços inoxidáveis austeníticos, uma vez que ele atua como precursor de outros tipos de corrosão, desde que em conjunto com condições de esforços mecânicos e de alteração do meio de forma que afete a sua composição química, como é o caso de impurezas que podem fragilizar a estrutura da liga. A partir desse contexto, pode-se questionar:

Como a composição química, os tratamentos térmicos e as alterações no meio podem afetar a eficiência dos aços inoxidáveis austeníticos quanto as suas propriedades de resistência à corrosão? Existem alternativas viáveis para substituir esses aços por outros da mesma categoria dos aços inoxidáveis?

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

Revisar a literatura em busca de evidências sobre como os aços inoxidáveis austeníticos da série 300 estão sujeitos a diferentes tipos de alterações de parâmetros como temperatura, pH e condições do meio em que estão inseridos, mesmo que esses aços sejam caracterizados por uma elevada resistência à corrosão pela adição de elementos de liga e por tratamentos térmicos que são submetidos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Verificar se existem parâmetros que são alterados que comprometem a eficiência do aço inoxidável austenítico AISI 304L quando comparado a outros aços inoxidáveis da série 300;

Identificar na literatura consultada estudos que remetam a como os parâmetros e condições que afetam a eficiência do aço AISI 304L ocorrem de fato e possíveis alternativas para substituir esse aço no seu campo de aplicação.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão de literatura, com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre o assunto apresentado, serão abordadas fundamentos sobre os aços inoxidáveis austeníticos, os fenômenos de corrosão localizada que remetem a sensibilização nesses aços e os efeitos dos tratamentos térmicos para minimizar os efeitos negativos dessa ocorrência.

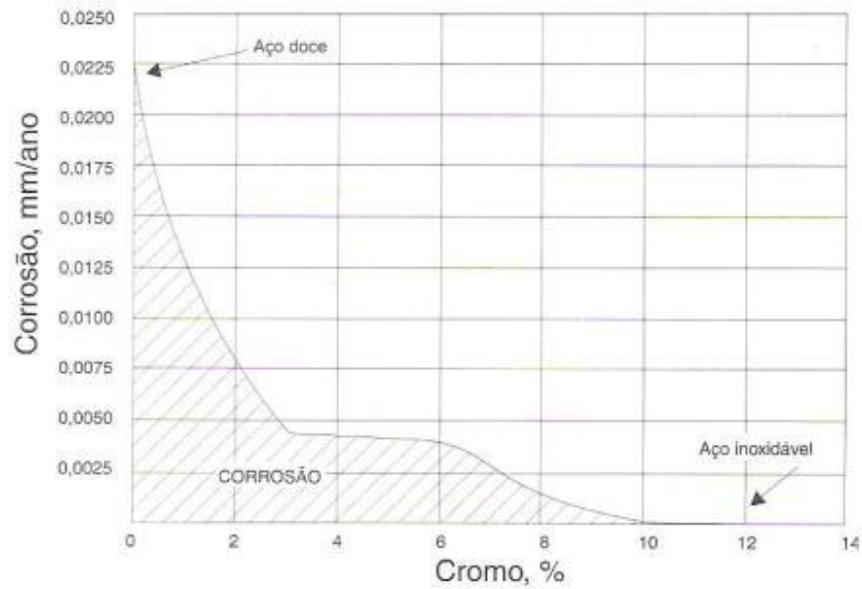
#### 3.1 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis possuem uma grande campo de aplicações graças a sua versatilidade e as suas propriedades mecânicas, físicas e metalúrgicas. Consistem em ligas a base de ferro com um baixo teor de carbono e com cerca de 10,5% de cromo, no mínimo, possuindo níquel em sua composição e outros elementos de liga e podem ser classificados nas seguintes famílias com base na sua microestrutura: ferríticos, austeníticos, martensíticos e duplex.

A principal característica dessas ligas é a sua alta resistência à corrosão atmosférica, fato este que se deve a adição de cromo, no qual é responsável por um fenômeno chamado de passivação. A presença de cromo permite a formação de uma fina camada de óxido na superfície do material que é resistente a dissolução de impurezas, não permitindo que elas penetrem e que não sofra a agressividade do meio que está inserido. Essa camada consiste em uma película transparente, composto de oxigênio presente no ar com o cromo que está no aço, além de não possuir porosidade, mantendo a estabilidade na superfície (SILVA, 2010).

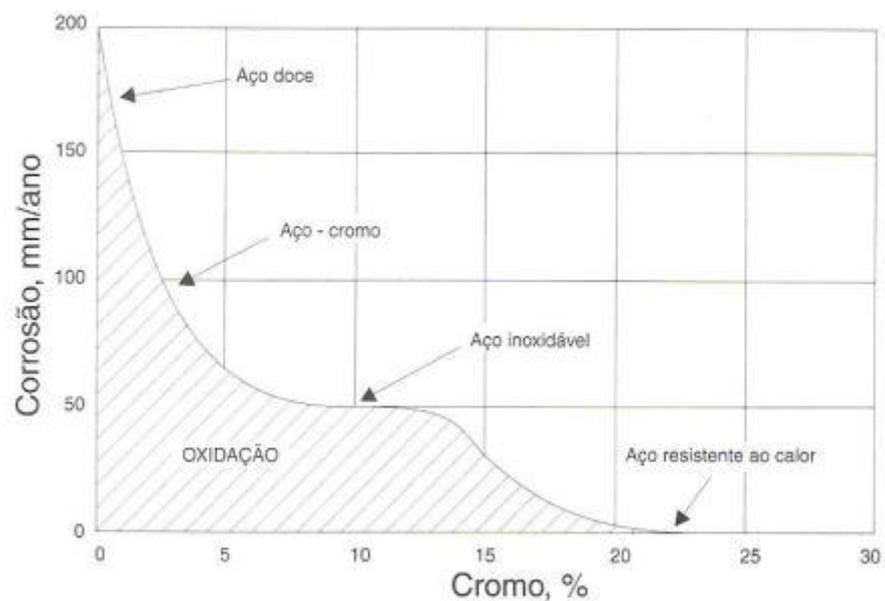
As figuras 1 e 2 mostradas a seguir ilustram como a taxa de corrosão é alterada pela adição de cromo (% em massa) na liga. Percebe-se que à medida que esse teor aumenta, menor a tendência do aço em apresentar corrosão. Comparado aos outros aços, é possível verificar que o aço inoxidável austenítico possui um melhor desempenho sob as mesmas condições se comparado com outros aços ao carbono.

Figura 1 – Passividade dos aços-cromo quando submetidos a uma atmosfera industrial durante 10 anos.



Fonte: Infomet – Aços e Ligas (2020)

Figura 2 – Gráfico ilustrando a resistência dos aços à oxidação a altas temperaturas com base no teor de cromo, estimando para tubos de 1/2" aquecidos por 48 horas a 1000°C ao ar.



Fonte: Infomet – Aços e Ligas (2020)

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem um teor de cromo variando entre 17% a 30%, contendo um baixo teor de níquel em sua composição, com uma estrutura homogênea e com boas propriedades mecânicas e físicas. São identificados no sistema AISI pela série 4XX, possuindo sua microestrutura a temperatura ambiente predominantemente de fase ferrita  $\alpha$ , cuja caracterização estrutural cristalográfica é cúbica de corpo centrado (CCC). A propriedade magnética dessa liga é o ferromagnetismo. Comparado aos martensíticos, o seu teor de carbono é bastante inferior, o que também possibilita que se tornem levemente austeníticos quando submetidos a temperaturas mais altas, formando martensita se aplicados a um resfriamento rápido e isso os caracterizam como parcialmente endurecíveis por tratamento térmico. (SILVA, 2007). Quando o teor de níquel é moderado, a tendência é que a austenita se torne metaestável e por isso esses tipos de aços estão suscetíveis a essa transformação de fase.

Os aços inoxidáveis martensíticos são aqueles caracterizados por uma matriz martensítica formada através de um rápido resfriamento submentido quando o material está acima da temperatura de austenitização. A martensita formada é uma fase enriquecida de carbono e que possui uma alta dureza, porém dispõe de uma alta fragilidade. Também são magnéticos, tipicamente ferromagnéticos, e podem ser endurecidos por precipitação (SILVA, 2007). Pelo sistema AISI, esses aços também fazem parte da série 4XX com estrutura cristalográfica tetragonal de corpo centrado (TCC). O cromo em sua composição varia entre 11,5% e 18% e o carbono em torno de 0,1% a 1,2%, o que permite obtenção de elevada dureza ao ser aplicado um tratamento térmico, por mais que a ductibilidade e tenacidade sejam reduzidas consideravelmente, sujeito a fragilização por hidrogênio em meios de sulfeto.

Os aços inoxidáveis duplêx possuem o cromo mais acentuado se comparado com os demais elementos de liga da sua composição, podendo esse valor ser acima de 20% de cromo, na qual sua característica microestrutural remete a um padrão bifásico composto de ferrita e de austenita, variando em proporção conforme a necessidade de aplicação dessa liga. Em termos gerais, a composição da fase ferrítica pode variar em entre 30% a 70% e as propriedades desejadas será definida com base na sua composição (SILVA, 2007). Pela presença de cromo em alta concentração e níquel em quantidade moderada em sua composição, as fases ferrita e austenita são estabilizadas.

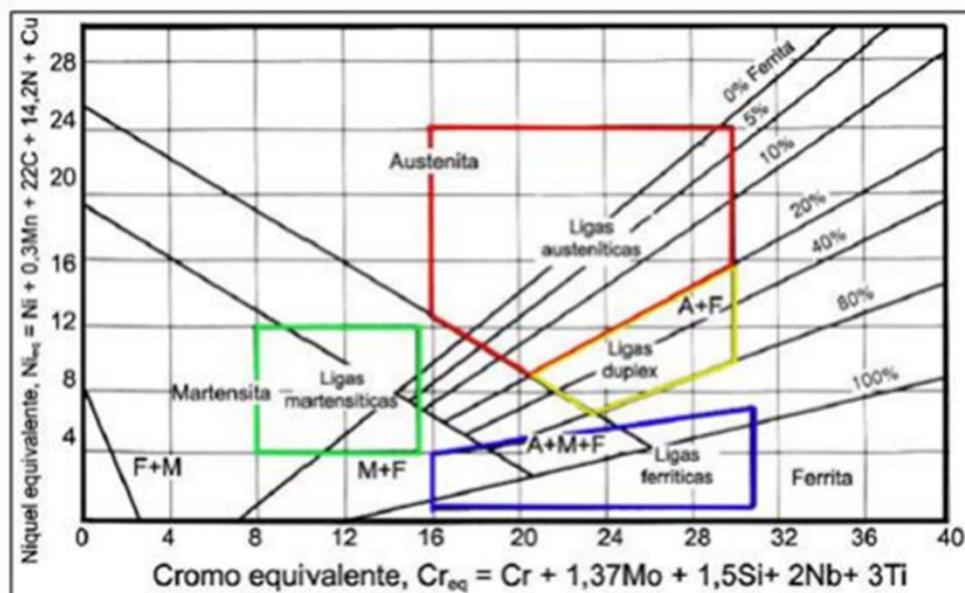
Outros elementos de liga, como o molibidênio, também atuam como austenitizantes, proporcionando uma boa resistência à corrosão, principalmente sob tensão, além de propriedades mecânicas excelentes, sendo essenciais para mercados atuantes com plataformas offshore, por exemplo, pois estão acima dos aços inoxidáveis austeníticos em termos de resistência mecânica. A limitação se encontra no elevado controle de parâmetros de

soldagem em campo para que não ocorra a formação de algum desequilíbrio entre as fases presentes na liga metálica.

Por fim, os aços inoxidáveis austeníticos possuem em sua composição cromo e níquel, os mais comuns são os 18-8, contendo 18% de cromo e 8% de níquel, apresentando uma boa resistência à corrosão. Não apresentam magnetismo e também não são endurecíveis por tratamento térmico, apesar de conferirem boa soldabilidade e ductibilidade quando comparados aos demais aços (SILVA, 2007). Esse aço, em particular o aço AISI 304 será detalhado adiante.

As microestruturas presentes nesses tipos de aços se devem basicamente pelos conceitos de elementos de liga que atuam como estabilizadores de uma fase ou de outra, como é o caso dos elementos que são estabilizadores da austenita (Ni, C, N e Mn) e os que estabilizam a ferrita (Cr, Si, Mo, Ti e Nb). Pode-se evidenciar isso por meio do diagrama de Schaeffler para os aços inoxidáveis no qual três regiões distintas são formadas: uma região inteiramente austenítica, ferrítica e martensítica, considerando as formulações para cromo e níquel equivalentes. Algumas regiões possuem duas ou mais fases presentes que aliadas a um processo mecânico e tratamento térmico eficiente, permitirão que os aços possuam propriedades bastante diversificadas (DAVIS, 1999). A figura 3 mostra os diferentes campos que constituem os aços que predominam austenita, ferrita ou martensita.

Figura 3 – Diagrama de Schaeffler para aços inoxidáveis.



Fonte: Adaptado ASM Speciality Handbook: Stainless Steels (1994).

Em meio aos aços citados, tem-se que os aços inoxidáveis austeníticos possuem uma maior comercialização e consumo, particularmente o aço AISI 304. Os aços dessa família da série 300 são os mais usualmente conhecidos, tendo em sua essência a composição a base de Fe-Cr-Ni com uma microestrutura estabelecida por meio de elementos de liga austenitizantes.

A figura 4 representa alguns aços inoxidáveis e suas faixas típicas de composição química quanto à presença dos elementos de liga que os constituem.

Figura 4 – Aços inoxidáveis e suas principais faixas de composições químicas e propriedades mecânicas.

	AISI	ASTM (UNS)	Aperam South America	DIN	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	OUTROS	Limite de Resistência (MPa) (4)	Limite de Escoamento (MPa) (4)	Alongamento 50mm (%) (4)
Austeníticos	301	S30100	P301A	1.4310	0,05 a 0,015	2,0	1,0	0,045	0,015	16,0 a 18,0	6,0 a 8,0	–	0,10	–	910	320	45
	301LN	S30153	P301F	–	0,03	2,0	1,0	0,045	0,03	16,0 a 18,0	–	–	0,07 a 0,2	–	700	400	50
	304	S30400	P304A	1.4301	0,07	2,0	0,75	0,045	0,015	17,5 a 19,5	8,0 a 10,5	–	0,10	–	720	320	57
	304	S30400	P304T(1)	1.4301	0,03	2,0	0,75	0,045	0,015	17,5 a 19,5	9,0 a 10,5	–	0,10	–	600	280	58
	304	S30400	P304N(1)	1.4301	0,07	2,0	0,75	0,045	0,015	17,5 a 19,5	8,0 a 10,5	–	0,10	–	600	280	58
	304L	S30403	P304C/D	1.4307	0,03	2,0	0,75	0,045	0,015	17,5 a 19,5	8,0 a 10,5	–	0,10	–	680	300	55
	304H	S30409	P304H	–	0,04 a 0,10	2,0	0,75	0,045	0,03	18,0 a 20,0	8,0 a 10,5	–	–	–	710	320	58
	310S	S31008	P310A	1.4845	0,08	2,0	1,5	0,045	0,015	24,0 a 26,0	19,0 a 22,0	–	–	–	600	380	42
	316	S31600	P316B	1.4401	0,07	2,0	0,75	0,045	0,015	16,5 a 18,0	10,0 a 13,0	2,0 a 2,5	0,10	–	650	340	51
	316L	S31603	P316B	1.4404	0,03	2,0	0,75	0,045	0,015	16,5 a 18,0	10,0 a 13,0	2,0 a 2,5	0,10	–	650	340	51
	317L	S31703	P317A	–	0,03	2,0	0,75	0,045	0,03	18,0 a 20,0	11,0 a 15,0	3,0 a 4,0	0,10	–	690	394	42
	321	S32100	P321A	1.4541	0,08	2,0	0,75	0,045	0,015	17,0 a 19,0	9,0 a 12,0	–	0,10	5 (C+N) ≤ Ti ≤ 0,70	670	260	42
	347/347H	S34709	P347A	–	0,04 a 0,08	2,0	0,75	0,045	0,03	17,0 a 19,0	9,0 a 13,0	–	0,02	Nb 10xC mín. 1,00 máx.	645	345	51
	Ferríticos	–	–	K03	1.4003	0,03	1,50	1,0	0,04	0,015	10,5 a 12,5	1,0	–	0,03	–	475	280
409		S40910	K09	1.4512	0,03	1,0	1,0	0,04	0,015	10,50 a 11,7	0,50	–	0,030	6(C+N) ≤ Ti ≤ 0,50 Nb 0,17	420	250	40
430		S43000	K30	1.4016	0,08	1,0	1,0	0,04	0,015	16,0 a 18,0	0,75	–	–	–	520	350	30
–		S43000	K30MD(2)	1.4016	0,08	1,0	1,0	0,04	0,015	16,0 a 18,0	0,75	–	–	Nb = 0,60 máx.	480	330	31
–		S43932	K39MD	–	0,03	1,0	1,0	0,04	0,015	17,0 a 19,0	0,50	–	0,030	0,20 + 4(C + N) ≤ Ti + Nb ≤ 0,75 Al 0,15	460	305	34
–		–	K41	1.4509	0,03	1,0	1,0	0,04	0,015	17,5 a 18,5	0,50	–	0,030	3C + 0,30 ≤ Nb ≤ 1,00 Ti = 0,10 a 0,60	460	295	35
Martensíticos	–	S44400	K44	–	0,025	1,0	1,0	0,04	0,03	17,5 a 19,5	1,0	1,75 a 2,50	0,035	0,20 + 4 (C+N) ≤ Ti+Nb ≤ 0,80	520	350	31
	420	S42000	P420A	–	0,15 Min.	1,0	1,0	0,04	0,03	12,0 a 14,0	0,75	0,50	–	–	620	370	26
Duplex	–	–	P498BV	1.4116	0,45 a 0,55	1,0	1,0	0,04	0,015	14,0 a 14,5	–	0,5 a 0,8	–	V = 0,10 a 0,20	–	–	–
	–	S32304	P398A	1.4362	0,03	2,0	1,0	0,035	0,015	22,0 a 24,0	3,5 a 5,5	0,1 a 0,6	0,05 a 0,20	Cu = 0,10 a 0,60	740	560	30
Série 200	–	S32205/ S31803	P399B	1.4462	0,03	2,0	1,0	0,03	0,015	22,0 a 23,0	4,5 a 6,5	3,0 a 3,50	0,14 a 0,20	–	840	660	27
	201	S20100	P298A	1.4618	0,15	5,50 a 7,50	1,0	0,06	0,03	16,0 a 18,0	3,5 a 5,5	–	0,25	–	515	260	40
	–	S20153	P201F	1.4376	0,03	6,80 a 7,5	0,20 a 0,60	0,045	0,015	17,0 a 17,5	4,0 a 4,5	–	0,15 a 0,20	–	700	500	45

Fonte: Adaptado Aperam Brasil (2015).

### 3.1.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

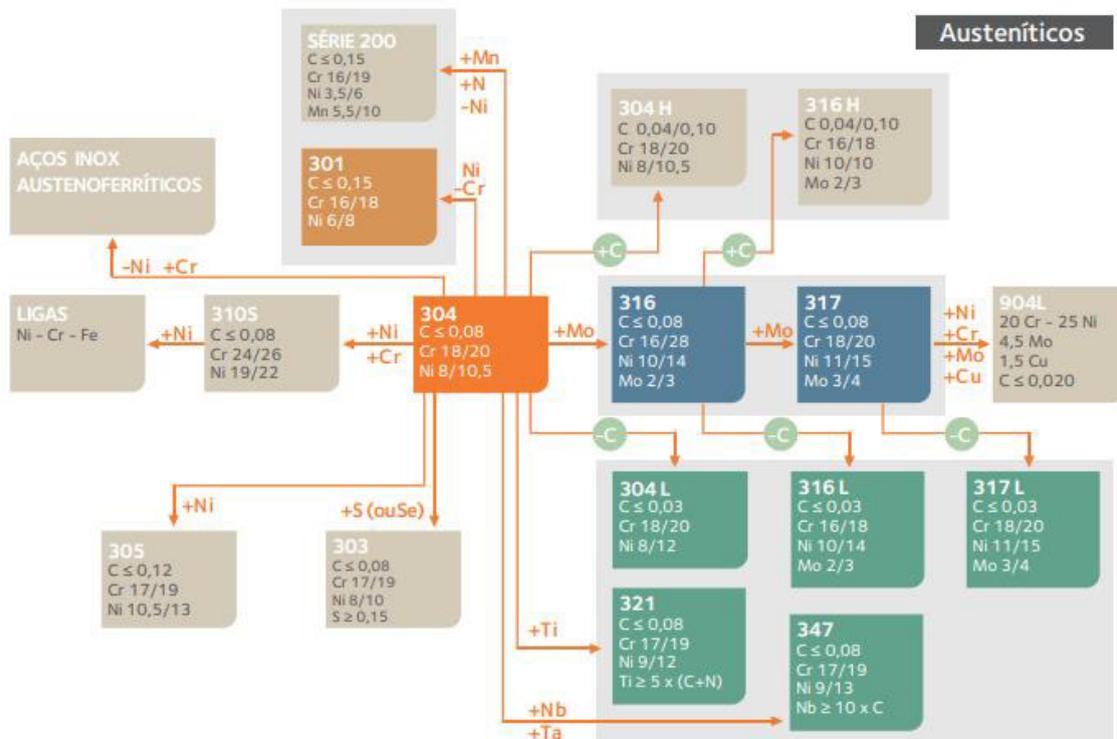
Os aços inoxidáveis austeníticos constituem o maior grupo dos aços inoxidáveis na qual suas ligas possuem ferro, carbono e cromo, dentre outros elementos de liga, em sua composição. São identificados pelo sistema AISI como aqueles que contemplam as séries 2XX e 3XX, na qual sua estrutura cristalográfica é definida como cúbica de face centrada (CFC) pela presença da fase austenita  $\gamma$  que se prolonga até a temperatura ambiente e isso se deve pela presença de uma alta concentração de Cr, podendo variar entre 15% e 32%, e pela presença de Ni variando até 30% (SEDRIKS, 1996).

Esses elementos conferem uma excelente resistência à corrosão aliada a ótimas propriedades de resistência mecânica, sendo similar a de aços de baixo carbono em torno de 210MPa de limite de escoamento mínimo a temperatura ambiente, além de ser favorável à ductibilidade e à tenacidade, o que permite uma campo de aplicação bastante variado. Em média, as temperaturas de serviço que esse aço pode ser submetido limitam até 760°C (LIPPOLD, 2005).

Os aços que compõem a série 2XX possuem um acréscimo de Mn, possuindo como característica a composição química de 15% Cr e 7% Mn em peso, enquanto que para os da série 3XX mais comuns desse grupo, a faixa de composição química característica é de aproximadamente 18% Cr e 8% Ni em peso. Esses aços não são magnéticos, também não são endurecíveis por precipitação, pois em decorrência da instabilidade da austenita quando sofre encruameqnto se transforma gradualmente em ferrita e, ao estar supersaturada de carbono, há um aumento da dureza.

Ligas compostas de Fe-Cr-Ni-Mn possuem uma resistência à corrosão inferior aos aços da série 300. O aço AISI 304 com elevado teor de enxofre pode melhorar propriedades de usinagem, no que origina o aço AISI 303. Quanto maior o percentual em massa de níquel, maior a chance do aço deixar de ser classificado como uma liga a base de níquel, em virtude de esse ser o elemento predominante (LIPPOLD, 2005). A figura 5 apresenta os tipos mais comuns de aços desses grupos, percebendo que para uma dada aplicação, o aço pode ser mais indicado do que outro para que o serviço ocorra de forma eficiente.

Figura 5 – Fluxograma com as principais variações a partir do aço inoxidável austenítico AISI 304.



Fonte: Carbó, H. M. (2011)

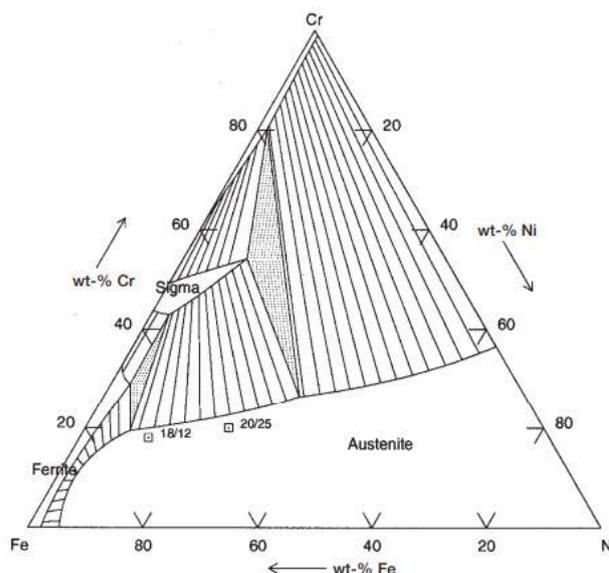
De uma forma geral, a maior parte dos aços do tipo “L” que possuem no máximo 0,030% C são os mais utilizados. A presença do carbono na liga ocorre de forma intersticial, possibilitando que sua difusão ocorra através da estrutura e se concentre nos contornos de grãos, promovendo uma precipitação de carbeto de cromo que influi na propriedade de resistência à corrosão. O cromo presente em solução sólida atua como um estabilizador do óxido  $(Fe, Cr)_2O_3$  que se forma superficialmente, visto que possui mais afinidade com o oxigênio se comparado ao ferro.

À medida que o nível de cromo pode ser elevado, as chances da liga adquirir uma melhor resistência em meios agressivos é maior, principalmente na presença de ácido nítrico, por exemplo. Assim, em ligas a base de Fe-Ni-Cr-C, quando aumenta a quantidade de Cr, haverá uma maior tendência à formação de ferrita, além de promover a formação de carbeto, no qual o  $M_23C_6$  é o mais típico nesse processo e essencial para o surgimento de compostos intermetálicos capazes de fragilizarem os aços inoxidáveis austeníticos. A fase sigma ( $\sigma$ ) também é comum em sistemas Fe-Cr em que se forma a uma temperatura abaixo de 815 °C, sendo mais propícia em ligas com alto teor de cromo. O cromo atua como elemento enriquecedor das fases intermetálicas chi ( $\chi$ ) e Laves (PADILHA, 2004).

A condutividade térmica é baixa, porém a expansão térmica é alta, o que conferem maiores problemas para a soldagem, podendo sofrer sensitização quando aplicados a elevadas temperaturas, promovendo uma corrosão intergranular expostos a meios agressivos. Para minimizar esse efeito, propõe-se que o teor de carbono seja baixo ( $C \leq 0,03\%$ ) e que sejam adicionados alguns elementos de liga como o Ti e o Nb que atuarão como estabilizadores e se fixarão ao carbono preferencialmente em forma da carbonetos de titânio e de nióbio. Teores de carbono muito baixos comprometem a resistência mecânica e dureza da liga.

Os aços da série 3XX possuem uma microestrutura formada devido à elementos austenitizantes, principalmente pela presença do níquel, que melhora consideravelmente a resistência à oxidação em elevadas temperaturas, auxiliando na formação de uma fina camada passivadora como visto anteriormente. A figura 6 ilustra como que o equilíbrio entre cromo e níquel pode resultar na fase desejada (CHIAVERINI, 2005; LIPPOLD, 2005; SEDRIKS, 1996).

Figura 6 – Diagrama Isotérmico para uma liga Fe-Cr-Ni a 750°C.

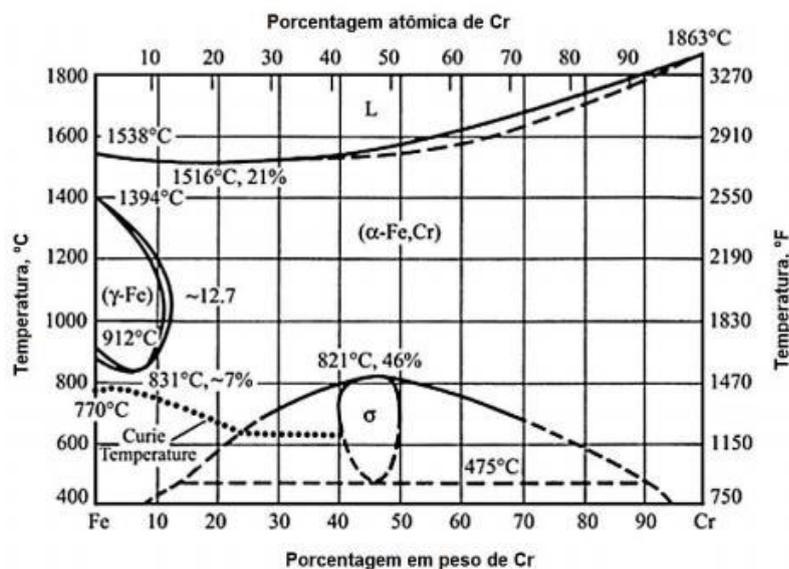


Fonte: Adaptado de Sourmail, T. (2011).

### 3.2 Diagrama de Fases

O aço inoxidável austenítico AISI 304 possui como principais componentes o Fe, Cr e Ni, encontrados na literatura e nos diagramas binário e ternário apresentados a seguir para uma melhor explicação da microestrutura característica dessa liga.

Figura 7 – Diagrama binário de equilíbrio Fe-Cr.



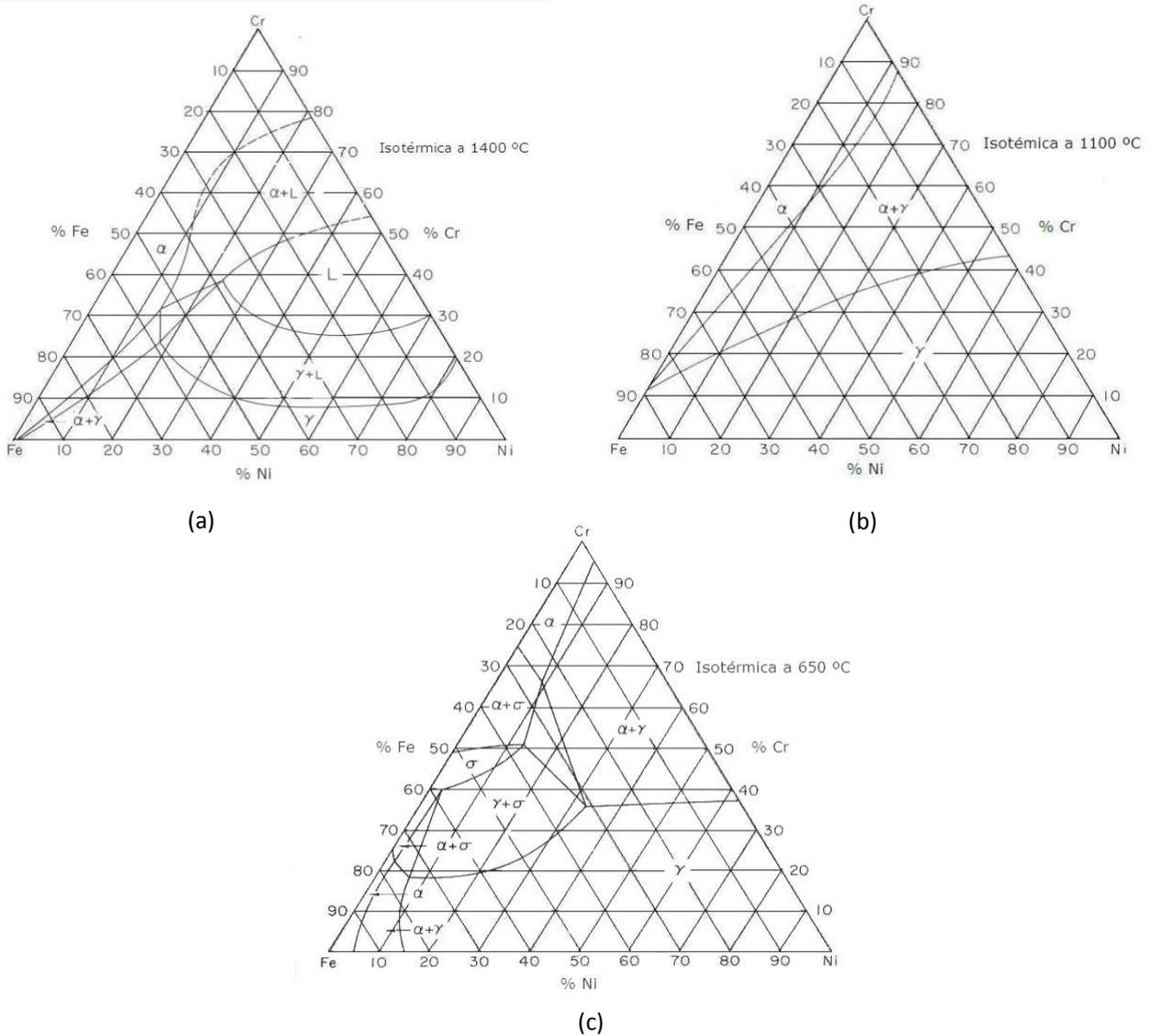
Fonte: Adaptado de Padilha (2002)

Analisando o diagrama Fe-Cr, percebe-se o papel do Cr como elemento ferritizante e a evidência da fase sigma. Para o diagrama ternário Fe-Cr-Ni é notório que o Ni assume um papel austenitizante e que a fase sigma é mais presente para uma faixa de composições mais extensas para temperaturas inferiores a 900 °C. Os diagramas são de grande utilidade quando se trata da previsibilidade de determinada microestrutura quando as condições são próximas do equilíbrio, muito embora, na prática, a precisão desses diagramas fica limitada quando há presença de vários elementos de liga e da termodinâmica envolvida no processo cinético desses componentes. (Padilha, 1994).

Os diagramas ternários representados na figura representam diferentes seções do sistema Fe-Cr-Ni às temperaturas de 1400 °C, 1100 °C e 650°C. Observa-se que nessas temperaturas as fases austenita  $\gamma$  e ferrita  $\alpha$  estão presentes, na qual o campo ferrítico se encontra nas regiões cujas composições possuem um maior teor de cromo, enquanto o campo austenítico se localiza nas proximidades das regiões em que o níquel predomina. O campo em que as duas fases existem concomitantemente a uma composição intermediária com os limites aumentando ao passo que a temperatura diminui.

Nota-se também que, na seção isotérmica a 650 °C da figura há uma fase sigma  $\sigma$  beirando composições com 50% de ferro e 50% de cromo. Para temperaturas inferiores, há possibilidade da ocorrência de uma fase com estrutura cristalográfica cúbica de corpo centrado (CCC) e com altos teores de ferro e de cromo, identificada como  $\alpha'$  (Padilha, 2002).

Figura 8 – Diagrama de fase ternário Fe-Cr-Ni para diferentes secções isotérmicas: (a) 1400°C, (b) 1100°C, (c) 650°C.

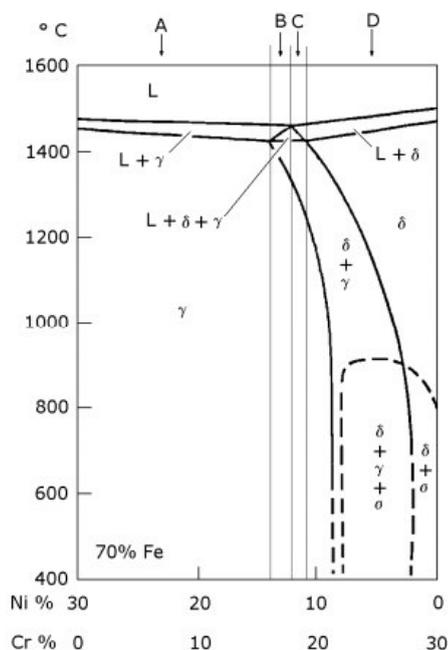


Fonte: Adaptado de Metals Handbook (1973).

### 3.3 Processo de Solidificação

O processo de solidificação dos aços inoxidáveis do sistema Fe-Cr-Ni apresentado tem como base a composição química e o equilíbrio dos elementos de liga que favorecem a formação de ferrita ou austenita, podendo ser definido em até quatro tipos conforme figura 9.

Figura 9 – Modos de solidificação conforme secção do diagrama de fases Fe-Ni-Cr à 70% Fe.



Fonte: Adaptado Ironmaking and Steelmaking, Kim e Shin (1995).

Os diferentes tipos de solidificação são indicados na tabela abaixo:

Tabela 1 – Diferentes tipos de solidificação.

Tipo	Transformações
A	Líquido (L) $\rightarrow$ L + $\gamma$ $\rightarrow$ $\gamma$
B	Líquido (L) $\rightarrow$ L + $\gamma$ $\rightarrow$ L + $\gamma$ + $\alpha$ $\rightarrow$ $\gamma$ + $\alpha$
C	Líquido (L) $\rightarrow$ L + $\alpha$ $\rightarrow$ L + $\alpha$ + $\gamma$ $\rightarrow$ $\alpha$ + $\gamma$
D	Líquido (L) $\rightarrow$ L + $\alpha$ $\rightarrow$ $\alpha$

Fonte: Autor

Em suma, cada um desses tipos de solidificação mencionados acima são definidos a seguir:

### 3.3.1 Tipo A: Solidificação austenítica

O processo consiste em uma solidificação que se inicia com o surgimento de pequenas dendritas de austenita contemplando a formação dessa fase predominante

### 3.3.2 Tipo B: Solidificação austenítica-ferrítica

Inicia-se com a formação de dendritas de austenita com formação de ferrita entre as ramificações das dendritas.

### 3.3.3 Tipo C: Solidificação ferrítica-austenítica

Nesse processo, a ferrita é a fase inicial que se forma com a morfologia de dendritas. Em seguida, há a formação de austenita na interface entre a ferrita e líquido, que é fundamentada em uma reação peritética ou, de acordo com a condição que estiver submetida a solidificação, em uma reação eutética que engloba três fases ( $L + \alpha + \gamma$ ). Quando ocorre a nucleação, a austenita tende a crescer para a ferrita e ao líquido, segregando os elementos que favorecem a ferrita para o interior da dendrita e para o líquido, estabilizando a ferrita no eixo da dendrita, causando a formação de ferrita nas regiões interdendríticas.

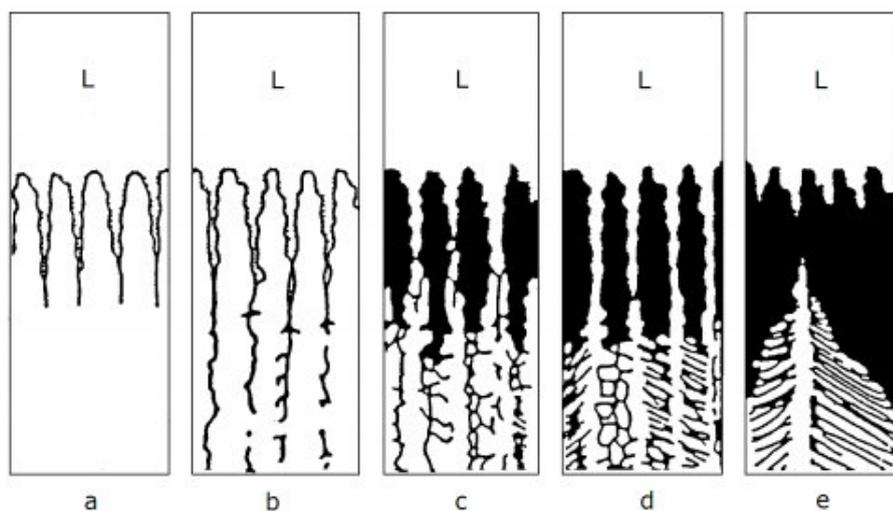
### 3.3.4 Tipo D: Solidificação ferrítica

Durante a solidificação, a ferrita se forma durante a solidificação propriamente dita, enquanto a austenita é estabilizada apenas no estado sólido, comumente caracterizada para os aços inoxidáveis duplêx.

Ressalta-se, porém, que o padrão de solidificação de uma liga não segue necessariamente os tipos e sequências que foram estabelecidas, pois é possível que ocorra a nucleação conjunta tanto da ferrita quanto da austenita em regiões distintas do líquido ao variar a velocidade de resfriamento ou até mesmo por causa da composição química durante a solidificação. Em outras palavras, as etapas e tipos de solidificação dependem da relação entre a velocidade de solidificação e principalmente da composição química, sendo essas variáveis responsáveis por definirem o nível de segregação e distribuição da ferrita ao longo da microestrutura, podendo ser dendrítica ou interdendrítica, como mencionado anteriormente, de acordo com o tipo de solidificação definido (LIPPOLD, 2005). A figura 10 exemplifica o processo de solidificação em diferentes tipos.

Figura 10 – Esquemático dos diferentes tipos de solidificação.

(a) Tipo A: o metal solidifica completamente como austenita, sem que ocorra alguma transformação em elevada temperatura;. (b) Tipo B: O início da solidificação ocorre quando há formação de dendritas de austenita, formando também ferrita entre os braços das dendritas; (c) Tipo C: A solidificação se dá com a formação de dendritas de ferrita e a austenita se forma em sequência na interface ferrita e líquido; (d) idem ao (c), entretanto a fração volumétrica de ferrita é maior; (e) Tipo D: A ferrita é a fase que se forma durante a solidificação, enquanto a austenita se forma através da transformação durante o estado sólido.



Fonte: Adaptado de Suutala (1979).

Durante o processo de solidificação é possível que haja a formação de trincas a quente. A tendência à formação dessas trincas se deve por causa da segregação de fósforo e enxofre, dentre outros elementos, que são responsáveis pela formação de fases com baixo ponto de fusão. Como a solubilidade desses elementos é maior na ferrita, a segregação interdendrítica é menos suscetível, reduz a tendência a formação de trincas.

### 3.3.5 Influência da composição química na solidificação.

Como foi descrito anteriormente, um dos fatores que contribui para o tipo de solidificação é a composição química. Para fazer uma previsão do modo que ocorrerá a solidificação dos aços inoxidáveis austeníticos, utiliza-se a relação Cromo-Equivalente e Níquel-Equivalente.

O procedimento para definir o equivalente em cromo ( $Cr_{eq}$ ) em níquel ( $Ni_{eq}$ ) de acordo com a composição química foi definido por Schaeffler e a formulação foi aperfeiçoada com o decorrer dos anos, possibilitando que a influência do nitrogênio fosse considerada, assim como DeLong reformulou. Genericamente, as expressões (1) e (2) podem ser representadas a seguir:

$$Ni_{eq} = \%Ni + A(\%Mn) + B(\%C) + C(\%N) + D(\%Cu) + E(\%Co) + F \quad (1)$$

$$Cr_{eq} = \%Cr + G(\%Si) + H(\%Mo) + I(\%Al) + J(\%Nb) + K(\%Ti) + L(\%W) + M(\%V) + N \quad (2)$$

Em que: A, B, ... , N são constantes.

Os valores das constantes de dado elemento são definidos e tabelados na literatura. Com base nas expressões (1) e (2), são feitos diagramas que aproximam a microestrutura que será obtida para um tipo específico de composição química. O diagrama de Schaeffler da figura 11, por exemplo, é constituído das relações obtidas de amostras soldadas de aços inoxidáveis austeníticos Fe-Cr-Ni, prevendo quanto de ferrita será formada na zona fundida, assim como outros autores desenvolveram diagramas similares para possíveis previsões, vide DeLong, Hull e Schoefer.

Para prever a forma que ocorrerá a solidificação, foi definido por Nayal e Beech o seguinte critério com base nos cálculos de cromo e níquel equivalente de Hammar e Svensson:

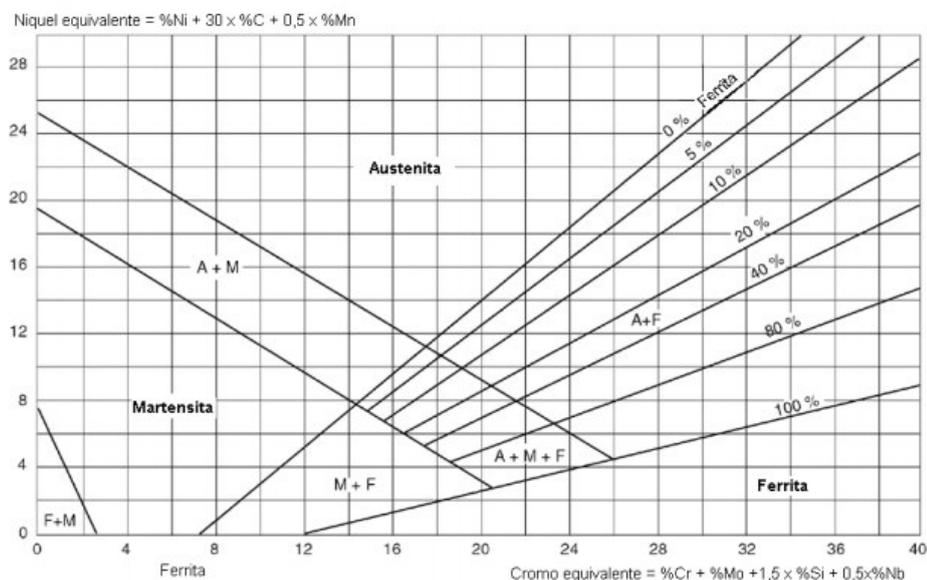
$$Cr_{eq} \div Ni_{eq} < 1,38 \quad (\text{Solidificação Tipo A})$$

$$Cr_{eq} \div Ni_{eq}: 1,38 - 1,50 \quad (\text{Solidificação Tipo B})$$

$$Cr_{eq} \div Ni_{eq}: 1,50 - 2,0 \quad (\text{Solidificação Tipo C})$$

$$Cr_{eq} \div Ni_{eq} > 2,0 \quad (\text{Solidificação Tipo D})$$

Figura 11 – Diagrama de Schaeffler



Fonte: Adaptado de Lippold, J.C. (2005).

Os principais elementos de liga são retratados a seguir de acordo com os seus respectivos efeitos nos aços inoxidáveis austeníticos:

**Carbono:** atua como elemento de liga intersticial, difundindo-se rapidamente na matriz e se concentrando nos contornos de grãos, comumente precipitando em forma de carbeto de cromo que atua negativamente na resistência à corrosão. Por isso, para os aços classificados como “L” com no máximo 0,03% de carbono, a probabilidade de que ocorra essa precipitação é menor. Entretanto, parâmetros como temperatura e tempo de resfriamento podem contribuir para o efeito contrário. Tratamentos térmicos podem dissolver os carbeto formados, mas para teores elevados, não haverá dissolução suficiente e esses carbeto continuarão presentes.

**Cromo:** tem como efeito chave promover a proteção contra a corrosão em meios oxidantes, pois há formação de uma película de óxido na superfície do aço, tipicamente  $(Fe, Cr)_2O_3$ . Para ambientes mais agressivos, o teor de cromo tem que ser maior para que haja uma maior estabilidade do óxido formado, além de promover a formação de ferrita. O cromo também atua na formação de carbeto, principalmente o  $M_{23}C_6$  que é responsável por fragilizar os aços inoxidáveis austeníticos. A presença desse elemento enriquece fases intermetálicas, como a fase sigma ( $\sigma$ ).

**Níquel:** esse elemento atua como estabilizador da austenita, aumentando a resistência do aço em altas temperaturas e da sua ductibilidade. Adicionando níquel é possível que haja uma expansão da fase austenita, estabilizando-a à temperatura ambiente. Apesar de não ser formado de compostos intermetálicos, alguns estudos o apontam como influenciador na cinética de precipitação.

Molibidênio: responsável por melhorar a resistência à corrosão por pite em ambientes que contenham íons Cl<sup>-</sup>, além de proporcionar um aumento da resistência em meio redutores. A presença desse elemento estabiliza a ferrita e pode auxiliar no processo de formação de várias fases prejudiciais.

Silício: elemento responsável pela desoxidação e está presente em torno de 0,3 a 0,6 %, além de melhorar a resistência à corrosão e estabilizar a ferrita.

Manganês: atua como estabilizador da austenita à temperatura ambiente, porém pode formar ferrita a temperaturas mais elevadas. Esse elemento também pode evitar a formação de trincas por solidificação (PADILHA, 1994; CHIAVERINI, 2005; SOURMAIL, 2001).

### 3.3.6 Influência da velocidade de resfriamento.

Durante a solidificação, a microestrutura também é alterada de acordo com a velocidade que ocorre este processo. As relações entre ( $Cr_{eq} \div Ni_{eq}$ ) se relacionam com o efeito transitório entre a solidificação primária de austenita para ferrita em diferentes condições de resfriamento. O aumento da velocidade de resfriamento é favorável à formação de ferrita primária até a temperatura ambiente caso a fase primária durante a solidificação fosse ferrita.

Tomando como base a solidificação com início da formação de dendritas de austenita, a ferrita estando presente, estará alocada em regiões interdendríticas, fato esse que se deve pela segregação dos elementos ferritizantes, como é o caso do cromo. Então, estima-se que menores velocidades de crescimento da austenita promoveriam uma segregação mais forte desses elementos, tendo de forma mais acentuada a formação de ferrita na estrutura.

Para velocidades mais elevadas, não haveria tempo o suficiente para esses elementos serem divididos entre as fases líquida e sólida, permanecendo, assim a austenita com um baixo teor de níquel e com uma elevada concentração de cromo, evidenciando o resultado contrário na fase líquida para condições relativas próximas do equilíbrio. A relação ( $Cr_{eq} \div Ni_{eq}$ ) reduziria ao ponto de haver uma tendência relativamente baixa na formação de ferrita (CHIAVERINI, 2005).

Para ligas que se iniciam com a formação da ferrita, a passagem para a austenita ocorreria durante a solidificação por meio de uma reação peritética ou por uma transformação de fases ainda no estado sólido. Para as duas situações, seria necessário que a difusão fosse relativamente lenta. Maiores quantidades de ferrita seriam observadas após um resfriamento rápido até a temperatura ambiente. Quanto maior for essa velocidade, maior será a tendência de formação de ferrita em grande quantidade. Esse comportamento se dá por tempos mais curtos para que ocorra a difusão, possibilitando que haja menos tempo para que ocorra a reação peritética para transformar a ferrita para austenita no estado sólido. Ainda vale

ressaltar que há uma necessidade de aprofundamento em estudos subsequentes que possam relacionar a forma que a ferrita delta é distribuída nos aços inoxidáveis austeníticos de acordo com a composição química e elementos de liga, tal como a influência da velocidade de resfriamento no processo (LIPPOLD, 2005).

### 3.4 Corrosão

#### 3.4.1 Definição

A corrosão pode ser definida como um fenômeno superficial de deterioração dos materiais através de um agente químico ou eletroquímico de um dado meio, sujeitando-se, em alguns casos, a esforços mecânicos. (GENTIL, V., 1996). Esse conceito é utilizado para explicar o processo de corrosão, porém, do ponto de vista energético, pode-se afirmar que o material exposto a determinado meio tende a se tornar mais estável, buscando pelo seu estado de menor energia, geralmente consistindo no seu estado ao ser encontrado na natureza, como é o caso da maioria dos aços, por exemplo o próprio ferro em que seu estado de menor energia encontrado na natureza é em forma de um óxido de ferro, conforme ilustrado na figura 12.

Figura 12 – Ciclo dos Metais.

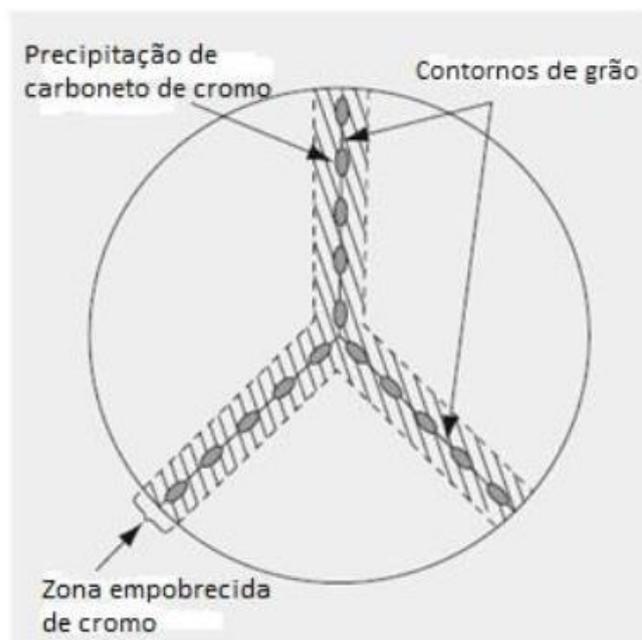


Fonte: Scientia, corrosão galvânica (2020).

### 3.4.2 Corrosão Intergranular

A relação com a temperatura depende do tempo de aquecimento, um exemplo é o caso de um aço inoxidável 18-8, no qual possui 18% de cromo e 8% de níquel, e um percentual em massa de carbono de 0,08%, quando submetido a poucos minutos em torno dos 750°C, quando o tempo de aquecimento for de uma hora, a temperatura fica na margem dos 550° a 740°C. Uma explicação para esse fenômeno pode ser embasada na relação de que alguns constituintes, em especial os carbonetos de cromo e ferro, dissolvem-se mais facilmente na austenita à medida que a temperatura se eleva a mais de 900°C. Um aço inoxidável sob essas condições e ao ser resfriado rapidamente, produz uma estrutura homogênea a temperatura ambiente que é instável a temperaturas inferiores à linha de solubilidade sólida do carbono na austenita. Quando o aço é aquecido novamente acima de 400°C, há um aumento da solubilidade dos átomos de carbono, precipitando assim esse carboneto nos contornos de grão ao atingir uma faixa de temperatura entre 600 a 800°C, conforme figura 13. Os carbonetos presentes nessas regiões retêm uma quantidade significativa de cromo em sua composição, enquanto que regiões vizinhas da matriz possuem pouco cromo, pois ele foi necessário para a formação dos precipitados de cromo e carbono, possibilitando que essas regiões empobrecidas se tornem menos resistentes a corrosão, principalmente entre os grãos de austenita. O líquido corrosivo possui caráter seletivo, atacando o metal nos contornos dos grãos, sem que o interior seja afetado, ocorrendo assim uma segregação dos grãos, desintegrando a liga, diminuindo a elongação e, em alguns casos mais severos, reduzindo as propriedades de tração (PADILHA, 2004).

Figura 13 – Sensitização nos contornos de grão em aço inoxidável austenítico



Fonte: Adaptado de International Molybdenum Association – IMO (2020).

### 3.4.3 Abordagens sobre outros principais tipos de corrosão

#### a) Corrosão Generalizada

Aquela em que há uma degradação do metal através de uma reação química ou eletroquímica em meio a superfície do metal e a sua ocorrência é uniforme na totalidade da superfície que tiver exposta à ocorrência desse fenômeno, caracterizado por uma perda gradual da espessura.

#### b) Corrosão Localizada

Esse tipo de corrosão ocorre em áreas limitadas da superfície do material que estiver em contato com o meio corrosivo, gerando perdas graduais da espessura e até mesmo em furos em determinadas regiões. Fatores como concentração de oxigênio, temperatura, sólidos em suspensão e afins, contribuem para esse tipo de corrosão. No caso dos aços inoxidáveis, por exemplo, um ambiente que contenha íons cloreto pode agravar a ocorrência de corrosão por pites.

### c) Corrosão Galvânica

Tipo de corrosão em que materiais metálicos diferentes estão em contato por meio de uma solução condutora ou eletrólito, promovendo uma diferença de potencial e uma passagem de corrente entre eles. Esse processo é definido pela reatividade de alguns metais que estão mais ou menos suscetíveis a esse fenômeno de acordo com a nobreza de cada metal.

De uma forma geral, metais menos nobres, possuindo baixo potencial eletrodo padrão, tem uma maior tendência à corrosão, enquanto metais mais nobres que possuem maiores potenciais, estarão sujeitos a um efeito menor do processo corrosivo se comparado ao outro, pois o de menor potencial se comportará como anodo e o de maior potencial como catodo, possibilitando que a taxa da corrosão galvânica dependa da área de contato exposta ao eletrólito.

A tabela abaixo ilustra o comportamento de alguns metais quanto a sua tendência à corrosão conforme seus respectivos potenciais padrão de eletrodo.

Tabela 2 – Série de Potenciais de Eletrodo Padrão.

	<i>Electrode Reaction</i>	<i>Standard Electrode Potential, V<sup>o</sup> (V)</i>
↑ Increasingly inert (cathodic)	$\text{Au}^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow \text{Au}$	+1.420
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^{+} + 4e^{-} \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.229
	$\text{Pt}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Pt}$	~+1.2
	$\text{Ag}^{+} + e^{-} \longrightarrow \text{Ag}$	+0.800
	$\text{Fe}^{3+} + e^{-} \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0.771
	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^{-} \longrightarrow 4(\text{OH}^{-})$	+0.401
	$\text{Cu}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Cu}$	+0.340
	$2\text{H}^{+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{H}_2$	0.000
	$\text{Pb}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Pb}$	-0.126
	$\text{Sn}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Sn}$	-0.136
↓ Increasingly active (anodic)	$\text{Ni}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Ni}$	-0.250
	$\text{Co}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Co}$	-0.277
	$\text{Cd}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Cd}$	-0.403
	$\text{Fe}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Fe}$	-0.440
	$\text{Cr}^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow \text{Cr}$	-0.744
	$\text{Zn}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Zn}$	-0.763
	$\text{Al}^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow \text{Al}$	-1.662
	$\text{Mg}^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{Mg}$	-2.363
	$\text{Na}^{+} + e^{-} \longrightarrow \text{Na}$	-2.714
	$\text{K}^{+} + e^{-} \longrightarrow \text{K}$	-2.924

Fonte: Disponível no blog COEMjr.

#### **d) Corrosão em frestas**

É um tipo de corrosão localizada que é comum em regiões espaçadas uma das outras, originando frestas, nas quais expõe a área metálica à ação corrosiva de acordo com a geometria e estrutura, como placas rebitadas, flanges e conexões, que estão vinculadas a parafusos e rebites. O espaçamento entre essas regiões acaba por se tornar um concentrador de oxigênio, possibilitando que as regiões externas as frestas atuem como catodos, enquanto as internas como anodos. Esse tipo de corrosão é comum em aços inoxidáveis, por exemplo.

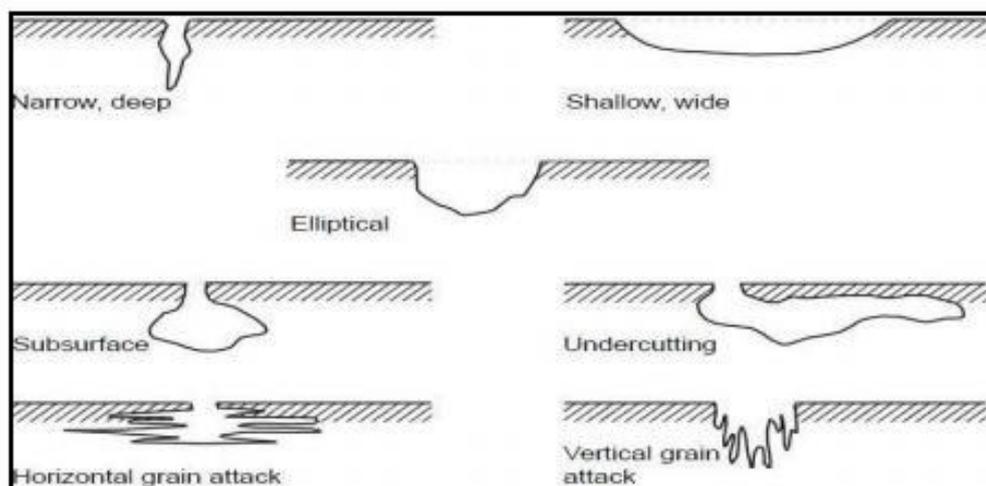
#### **e) Corrosão por pites**

Outro tipo de corrosão localizada que tem como característica a perfuração da superfície metálica que estão passivadas, como o que ocorre nos aços inoxidáveis. Regiões que são pouco aeradas atuam como uma região anódica ao passo que as regiões aeradas se comportam como regiões catódicas, embora estejam passivadas com uma pequena película muito fina formada a partir de óxido, isolando o metal do meio.

Em partes dessa película que possuam uma menor espessura, há uma maior tendência ao rompimento dessa película, até mesmo pontos que possuam uma maior fragilidade estão suscetíveis à formação de um pequeno ponto que funcionará como anodo em meio a região protegida que atuará como catodo. Esse sistema galvânico inicia um processo de corrosão que é de difícil identificação, pois sua ocorrência se dá preferencialmente no interior de equipamentos, apesar de ocorrer perda de massa e de espessura do material, o desgaste não pode ser visualizado de início (PADILHA, 2004).

A presença de cloretos e um meio que haja variação de temperatura e de pH, uma vez que o pH ácido dificulta na reposição da película passiva rompida. Quando ocorre esse rompimento, o processo de corrosão é sequenciado e há o princípio de formação de cavidades, que podem variar em aspectos geométricos e em sua forma, conforme é representada na figura a seguir.

Figura Figura 14 – Típicas variações de pites em superfícies de materiais metálicos.



Fonte: Handbook of Corrosion Engineering (1999).

### 3.5 Tratamentos Térmicos

Define-se como tratamento térmico o processo aplicado em peças constituídas de metais ou ligas por meio da ação do calor visando modificar sua estrutura e propriedades mecânicas, físicas e químicas. Este processo atua com o objetivo de melhorar a aplicabilidade do material e garantir a utilidade dele. (NOVIKOK, I., 1994). Durante o tratamento térmico, as condições de aquecimento e de resfriamento são controladas conforme os parâmetros de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, o que confere características específicas para os aços e ligas submetidos a essa operação.

#### 3.5.1 Solubilização

A solubilização consiste no tipo de tratamento térmico que submete o aço a uma temperatura até um determinado ponto em que os solutos se difundam na solução da matriz, mantendo uma estrutura homogênea sem que ocorra a formação de precipitados. Quando a temperatura estabelecida é alcançada, ela é mantida por um período, que varia de acordo com as propriedades, composição química e dimensões da peça, e se aplica um resfriamento rápido, utilizando meios refrigerantes como a água, para que não ocorra a formação de precipitados indesejáveis, de forma a suprimir o tempo necessário para que esses elementos se formem. É importante salientar que o tempo do processo deve ser controlado com bastante precisão, pois pode afetar a solubilização dos elementos caso seja muito curto ou incrementar

processos oxidativos ao expor o material por um longo período a altas temperaturas, além de gerar um crescimento de grão indesejável e um consumo energético desnecessário.

Esse tipo de tratamento térmico é usualmente aplicado aos aços inoxidáveis austeníticos antes de serem aplicados em um ambiente de trabalho, na sua pós produção. Dessa forma, as fases precipitadas que foram geradas durante os processos de conformação mecânica do material podem ser dissolvidas. A fase mais comum nesses aços é o  $M_{23}C_6$  que se forma preferencialmente nos contornos de grão (CHIAVERINI, 2005).

Para esse tratamento, estima-se que o parâmetro de temperatura deve ser 900 °C, entre 1 a 10 horas, pois o carboneto de cromo  $M_{23}C_6$  tem uma maior probabilidade de ocorrer entre a faixa de 450 °C a 900 °C. É recomendável que a faixa de temperatura seja de 1035 °C e 1120 °C e após um resfriamento rápido em água até a temperatura ambiente. De fato, a solubilização promove a dissolução dos carbonetos formados por meio de um alívio pleno, prevenindo a precipitação intergranular dos carbonetos indesejáveis (GIMENES JR., 1997).

O tratamento de solubilização, do inglês *solution annealing*, consegue aliviar boa parte das tensões residuais remanescentes além de dissolver o carboneto  $M_{23}C_6$ , promove também a transformação da ferrita em austenita durante o equilíbrio de fases. É importante que os carbonetos sejam dissolvidos completamente, porém esse processo demanda tempo e ocorre lentamente, uma vez que o tamanho de grão também deve ser controlado e isso é feito por meio do controle da temperatura, limitando-a. Para os aços inoxidáveis austeníticos usualmente empregados, como o AISI 304 e 304L, ressalta-se que a faixa de temperatura de solubilização fique em torno de 1120 °C. Para temperaturas superiores a 1035 °C, os carbonetos enriquecidos de cromo se solubilizam na matriz austenítica, podendo ocorrer a dissolução parcial ou total dos precipitados (PANOSSIAN, 1993; SILVA, 2007).

O resfriamento tem que ser rápido o suficiente para que, ao passar pela faixa crítica, não ocorra o fenômeno de sensitização, devido à precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grãos ou adjacências, de maneira que todo o Cr e C estejam como solução sólida na matriz austenítica, supersaturada em C e livre de carbonetos nos contornos de grão, gerando assim um aço inoxidável de fato estabilizado (SILVA, 2007).

Essas etapas são fundamentais para a comercialização desses aços produzidos na sua forma de chapas e outros produtos que foram fabricados a base de aço inoxidável austenítico, submetido a um processo de solubilização. Porém, caso esses produtos forem submetidos a processos que elevem a sua temperatura, como soldagem, por exemplo, é interessante que passem por um novo processo de solubilização. O que dificulta essa prática é o tamanho e a forma do produto acabado, tornando o tratamento inviável (PANOSSIAN, 1993).

O tratamento de solubilização se torna viável para peças que possuem dimensões moderadas ou até mesmo com pequenas espessuras. Tubos que possuem costura soldada, peças forjadas ou fundidas, devem possuir nas suas especificações de material que foram tratados termicamente e estabilizados para desfazer a sensitização causada durante o processo de produção desses materiais que possuem sua constituição de aço inoxidável austenítico (TELLES, 2003).

Tabela 3 – Faixas de temperaturas para tratamento de solubilização em alguns aços inoxidáveis austeníticos.

<b>Tipo AISI</b>	<b>Temperatura °C</b>
<b>201, 202</b>	1010 ~ 1120
<b>303</b>	1010 ~ 1120
<b>304, 306, 308</b>	1010 ~ 1120
<b>304L</b>	1010 ~ 1120
<b>309</b>	1010 ~ 1120
<b>310</b>	1040 ~ 1065
<b>314</b>	1040 ~ 1120
<b>316</b>	1040 ~ 1120
<b>317</b>	1040 ~ 1105
<b>316L, 317L</b>	1040 ~ 1105
<b>321</b>	955 ~ 1065
<b>347, 348</b>	980 ~ 1065

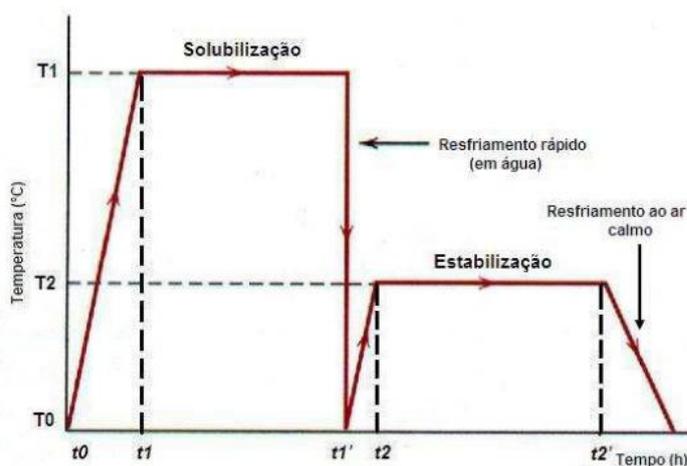
*Fonte: Autor.*

### 3.5.2 Estabilização

A corrosão intergranular é a principal problemática durante a produção dos aços inoxidáveis austeníticos e pode ser evitada utilizando tratamento térmicos específicos. Um deles foi definido anteriormente, o tratamento de solubilização. Outro tratamento que pode ser

aplicado em seguida é o de estabilização, visando assegurar a resistência à corrosão intergranular. No geral, esse tratamento é realizado após a solubilização, conforme figura abaixo:

Figura 15 – Ciclos térmicos de solubilização e estabilização.



Fonte: MetalMat UFRJ, Gozaga (2012)

O principal objetivo do processo de estabilização é precipitar do carbono remanescente no aço inoxidável austenítico que foi acrescido de titânio ou de nióbio para que fosse formado carbonetos preferenciais com o carbono de maneira a preservar o cromo em solução sólida mesmo em altas temperaturas, garantindo que ocorra a precipitação com esses elementos que não contribuem para a perda de resistência à corrosão, removendo tensões residuais ou facilitar a difusão do cromo para regiões que ficaram empobrecidas desse elemento (MODENSI, 2001).

Aços que foram estabilizados apresentam em sua composição Nb ou Ti que forma carbonetos mais estáveis, servindo como removedores do carbono livre em solução sólida para que não haja a precipitação de  $M_{23}C_6$ . Ligas como a AISI 321 e AISI 347 são mais comuns de possuírem essa configuração de composição química (PANOSIAN, 1993).

A tabela 4 a seguir retrata as condições de temperatura para quais ocorre precipitação de fases indesejadas que contribuem para o processo de sensibilização nos aços inoxidáveis austeníticos.

Tabela 4 – Faixa de temperatura de sensitização para alguns aços inoxidáveis austeníticos.

<b>Aço Inoxidável Austenítico – AISI</b>	<b>Faixa de temperatura de sensitização (°C)</b>
<b>304</b>	370 – 815
<b>316</b>	370 – 815
<b>304H</b>	370 – 815
<b>316H</b>	370 – 815
<b>321, 347</b>	400 – 815

Fonte: Autor.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Tipo de Estudo

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).

Seguindo essa orientação, a perspectiva seguiu conforme as etapas a seguir:

#### 4.1.1 1ª Etapa: Fontes

As fontes utilizadas para o presente trabalho serão descritas abaixo:

- a) Foram utilizados alguns livros de fundamentos da metalurgia que abordam assuntos relacionados à transformações de fases, tratamentos térmicos, aços e ferros fundidos, corrosão, dentro outros que se referem a temática, em idioma português e inglês, disponíveis na biblioteca do centro de tecnologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), publicados no período de 1977 a 2009.
- b) Artigos científicos e dissertações sobre a temática foram acessados nas bases de dados Scielo e Science Direct, repositório da Universidade Federal do Ceará (UFC) e da Universidade de São Paulo (USP), disponíveis online e com o texto completo. Os seguintes assuntos foram discutidos: aços inoxidáveis, aços inoxidáveis austeníticos, influência dos elementos de liga nas propriedades físicas e químicas dos aços inoxidáveis, tipos de corrosão, corrosão intergranular, sensibilização, propriedades físicas e químicas dos aços inoxidáveis austeníticos, tratamentos térmicos, solubilização de aços inoxidáveis austeníticos e suas aplicações.
- c) Foram utilizadas 3 monografias disponíveis nas plataformas virtuais de outras universidades, como a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), do Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro (CEFET/RJ) e da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Para a seleção das fontes, alguns critérios foram considerados, incluindo na revisão bibliográfica materiais que abordassem os principais princípios e fenômenos

envolvidos nos processos termo-metalúrgicos nos aços inoxidáveis austeníticos considerados pertinentes para o entendimento do assunto e promovendo uma abordagem ampla e também direta ao tema, excluindo aqueles que tangenciavam a temática, principalmente por retratarem outras famílias de aços inoxidáveis que não atenderiam a proposta do estudo.

#### **4.1.2 2ª Etapa: Coleta de Informações e Dados**

A coleta de dados seguiu a premissa de:

- a) Leitura exploratória do material selecionado de forma rápida e objetiva visando verificar a aplicabilidade da obra no presente trabalho;
- b) Leitura seletiva, aprofundando as secções mais pertinentes e de interesse ao tema;
- c) Registro das informações que foram extraídas das fontes consultadas em instrumento específico, como autores, ano, método, resultados e conclusões.

#### **4.1.3 3ª Etapa: Análise e Interpretação dos Resultados**

Para esta etapa, realizou-se uma leitura dinâmica e analítica com o intuito de ordenar e resumir as informações das fontes obtendo respostas para a problemática da pesquisa.

#### **4.1.4 4ª Etapa: Discussão dos Resultados**

Todo o fundamento formulado a partir da etapa anterior que serviu como base para o entendimento da problemática foi analisado e discutido a partir de uma ótica baseada no referencial teórico relativo à temática do estudo.

## **5 ASPECTOS ÉTICOS**

Durante a execução desse trabalho, houve total responsabilidade em citar os autores utilizados no estudo conforme rege a norma regulamentadora brasileira 6023 que trata sobre os elementos que serão incluídos e orienta a compilação e produção de referências. Diante disso, todos os dados coletados foram utilizados exclusivamente para a finalidade científica.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Com base na premissa levantada por esse estudo exploratório, as fontes selecionadas nas quais tiveram melhor conjunto de informações foram os artigos científicos que serviram para fundamentar os principais pontos questionados no início do trabalho.

A tabela 5 abaixo ilustra as fontes que foram selecionadas para um melhor aprofundamento no assunto e que abordassem a temática estabelecida de forma que construíssem um raciocínio condizente com o cunho científico de cada material coletado, evidenciando a metodologia de leitura utilizada e as principais informações analisadas por autor e obra.

Tabela 5 – Revisão dos estudos publicados sobre aços inoxidáveis utilizados nesse trabalho e tipo de método para coleta de dados.

Referências (ano da publicação)	Estudo Realizado	Método de Seleção	Principais informações selecionadas
Schneider, Kuron. (1990)	AES analysis of pits and passive films formed on Fe-Cr Fe-Mo and Fe-Cr-Mo alloys	Leitura Seletiva	Suscetibilidade à corrosão por pites dos aços 304L e 316L em um meio enriquecido em íon cloreto. O aço 316L se mostrou mais resistente à corrosão.
Alamr, Bahr, Jacroux. (2006)	Effects of alloy and solution chemistry on the fracture of passive films on austenitic stainless steel	Leitura Seletiva	Comprovação de que a composição química influencia na resistência à corrosão dos aços AISI 304, 316 e 904L. O aço AISI 316 obteve menor desempenho, enquanto o aço 904L melhor.
Machado et al. (2006)	Effect of temperature on the level of corrosion caused by heavy petroleum on AISI 304 and AISI 444 stainless steel	Leitura Seletiva	Alguns aços inoxidáveis austeníticos aplicados em elevadas temperaturas, tem um desempenho não satisfatório se comparado ao aço inoxidável AISI 444, que possui maior resistência.
Mateo et al (1997)	Characterization of the intermetallic G-phase in an AISI 329 duplex stainless steel	Leitura Exploratória	Como ocorre a precipitação de fases intermetálicas em um aço inoxidável e as condições de temperatura, resfriamento e composição química nesse comportamento.
Padilha (2007)	Precipitation in AISI 316L(N) during creep tests at 550 and 600 C up to 10 years	Leitura Exploratória	Efeitos da formação de fases indesejáveis em um aço inoxidável austenítico da série 300 submetido e a influência de ciclos térmicos nesse processo.
Ogwu, Davis (1997)	Improving the sensitisation resistance of ferritic stainless steels	Leitura Exploratória	Influência do Titânio e do Níbio como mecanismo para diminuir o efeito da sensitização nos aços inoxidáveis, tal como adição de outros elementos de liga que sirvam como alternativa.

(continua)

Bellezze et al (2008)	Improvement of pitting corrosion resistance of AISI 444 stainless steel to make it a possible substitute for AISI 304L and 316L in hot natural waters	Leitura Exploratória	Aço AISI 444 como alternativa para substituir aços AISI 304L e 316L em equipamentos que operem com temperaturas elevadas, parametrizando através da resistência à corrosão por pites.
Cardoso et al (2016)	Pitting corrosion resistance of austenitic and superaustenitic stainless steels in aqueous medium of NaCl and H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Leitura Seletiva	Como o meio afeta a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos 304L, 316L e 317L e uma alternativa para substituição desses aços com uma liga superaustenítica.
Xie et al (2000)	Orientation of $\gamma$ to $\alpha$ transformation in Xe-implanted austenitic 304 stainless steel	Leitura Exploratória	Transformação de fases em um aço inoxidável austenítico AISI 304, quanto à formação de ferrita a partir de austenita.
Lai et al (2009)	Recent developments in stainless steels.	Leitura Exploratória	Visão geral do desenvolvimento dos aços inoxidáveis austeníticos, perspectivas futuras e novas aplicações.
Lee et al (1999)	Effect of isothermal treatment of SAF 2205 duplex stainless steel on migration of $\delta/\gamma$ interface boundary and growth of austenite	Leitura Exploratória	Efeito de tratamento térmico isotérmico em aço inoxidável e desenvolvimento da austenita.
Singhal, Martin (1967)	The growth of M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> carbide on incoherent twin boundaries in austenite	Leitura Exploratória	Precipitados formados a partir do carbono em aço inoxidável austenítico.
Padilha et al (2008)	Investigation on the intergranular corrosion resistance of the AISI 316L(N) stainless steel after long time creep testing at 600°C	Leitura Exploratória	Corrosão intergranular e os seus efeitos na resistência à corrosão do aço inoxidável austenítico AISI 316L(N).
Parvathavarthini, Dayal (2002)	Influence of chemical composition, prior deformation and prolonged thermal aging on the sensitization characteristics of austenitic stainless steels	Leitura Exploratória	Composição química como parâmetro que afeta a resistência mecânica de aços inoxidáveis austeníticos submetidos a tratamento térmico de envelhecimento para caracterizar a sensistização.
Dowling et al (1999)	Corrosion and Toughness of Experimental and Commercial Super Ferritic Stainless Steels.	Leitura Exploratória	Susceptibilidade à corrosão intergranular e ligas comercialmente aplicáveis como alternativa para os aços inoxidáveis austeníticos.

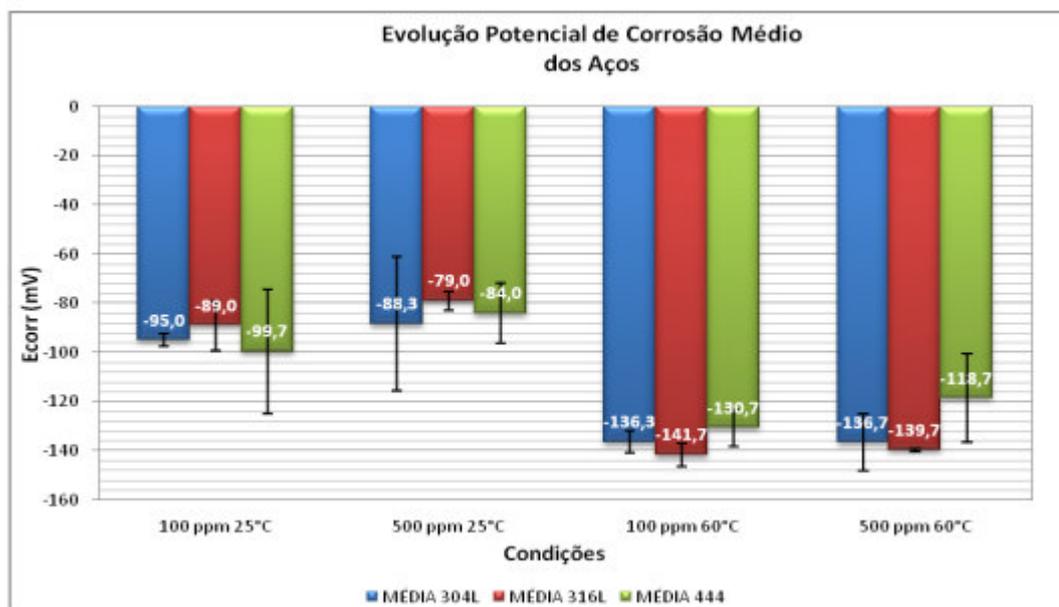
(continua)

Howell et al (1979)	The Austenite/Ferrite Interface In A Duplex Alloy Steel: Structure And Associated Diffraction Effects. A Short review on wrought austenitic stainless steels at high temperatures: processing, microstructure, properties and performance	Leitura Exploratória	Aços inoxidáveis duplex e suas estruturas.
Plaut et al (2007)	A thermodynamic model of the effects of composition on the susceptibility of austenitic stainless steels to intergranular stress corrosion cracking	Leitura Exploratória	Efeitos das elevadas temperaturas nos aços inoxidáveis austeníticos e como afetam o seu desempenho.
Fullman (1982)	The emphasis of phase transformations and alloying constituents on hot cracking susceptibility of type 304L and 316L stainless steel welds	Leitura Exploratória	Efeitos da composição química para a susceptibilidade à corrosão nos aços inoxidáveis austeníticos.
Saluja, Moeed (2012)	Sensitisation and Evolution of Chromium-depleted Zones in Fe-Cr-Ni-C Systems	Leitura Exploratória	Transformações de fases que ocorrem nos aços inoxidáveis austeníticos e susceptibilidade à corrosão nos aços AISI 304L e 316L.
Sourmail et al (2003)	Precipitation in creep resistant austenitic stainless steels	Leitura Exploratória	Influência da perda de cromo em regiões específicas da microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos e seus efeitos.
Sourmail et al (2001)	A new BCC-FCC orientation relationship observed between ferrite and austenite in solidification structures of steels	Leitura Exploratória	Precipitados de cromo e carbono em aços inoxidáveis austeníticos.
Headley, Brooks (2002)	Conditions of existence of a disordered solid solution having chemical interactions between the atomic species	Leitura Exploratória	Processo de solidificação nos aços inoxidáveis austeníticos.
Ustinovshikov et al (2005)	Creep-Resistant, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Forming Austenitic Stainless Steels	Leitura Exploratória	Interações químicas que podem afetar a existência de solução sólida na matriz da liga.
Yamamoto et al (2007)		Leitura Exploratória	Aços inoxidáveis austeníticos com formação de películas passivas.

Fonte: Autor

Sanches, Leonardo Paiva, (2009), evidenciou que o aço AISI 316L, por exemplo, quando exposto a um meio que possui concentração de cloreto elevada e expostos a diferentes faixas de temperaturas em torno de 60 °C, pode apresentar uma menor suscetibilidade a corrosão, visto que o aço AISI 304L apresenta um desempenho não satisfatório sob as mesmas condições. O comportamento em relação à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304L e 316L apresentados no trabalho foram comparados a de um aço inoxidável ferrítico AISI 444, também elemento de estudo, sob condições de trabalho de até 60 °C, conforme parâmetro de temperatura que o equipamento revestido com esses aços opera. O potencial de corrosão é reduzido quando se aumentava as concentrações de Cl<sup>-</sup> em solução de NaCl tanto para a temperatura de serviço quanto para a temperatura ambiente, que no estudo foi de 25 °C. O aço AISI 444 obteve destaque e obteve potenciais de corrosão mais positivos para temperaturas mais elevadas. A figura 16 abaixo ilustra esse comparativo entre os aços estudados:

Figura 16 – Potencial de corrosão médio dos aços AISI 304L, AISI 316L e AISI 444 para condições impostas.

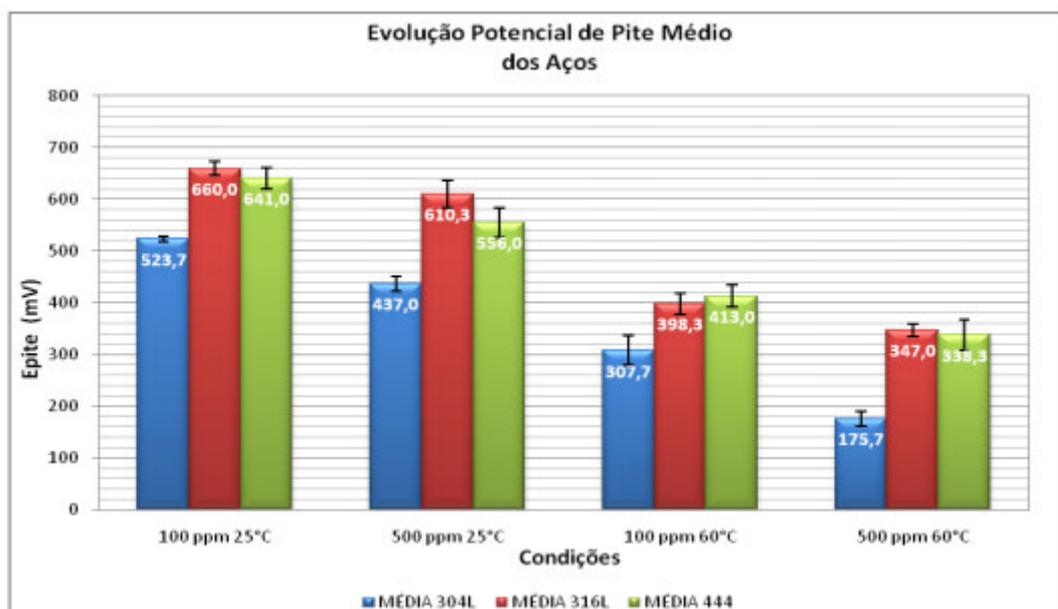


Fonte: Sanches, 2009.

Verificou-se que o potencial de corrosão se manteve bem próximo em todas as situações, entretanto as maiores variações foram observadas com o aumento da temperatura e da concentração de íons cloreto. Foi possível observar que os valores dos potenciais médios de corrosão reduziram à medida que aumentava a concentração de cloreto de sódio e a

temperatura da solução. Ele constatou também que o aço AISI 316L teve valores mais elevados de potencial de corrosão a temperatura ambiente, para o aço AISI 444 foi um pouco inferior, porém próximo se comparado ao AISI 316L. Esse fenômeno se deve porque há formação de uma fina camada passiva com maior capacidade de passivação pela presença de molibidênio, pois tem um efeito positivo na resistência à corrosão localizada. O aço AISI 304L, apesar de não possuir molibidênio em sua composição, obteve bons resultados para essa temperatura, porém ficou abaixo dos outros aços. O fato foi evidenciado pelo autor e mostrado na figura 17 a seguir.

Figura 17 – Potencial médio de corrosão localizada (por pite) dos aços inoxidáveis AISI 304L, AISI 316L e AISI 444L para todas as condições impostas.



Fonte: Sanches, 2009.

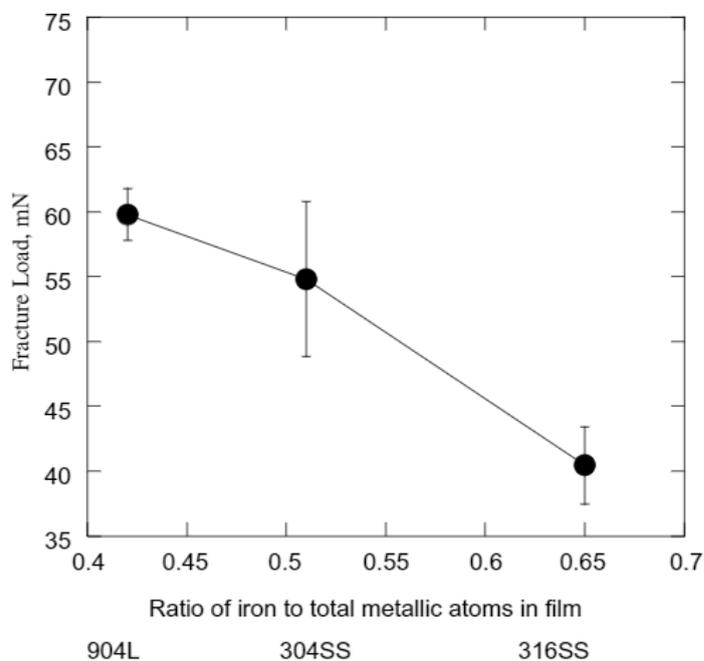
Para valores a 60 °C, afirmou que efeito da temperatura foi determinante para prescrever se aço inoxidável tinha maior susceptibilidade à corrosão ou não, como foi o caso do AISI 304L, que teve sua propriedade de resistência à corrosão prejudicada pela temperatura do que pela presença de Cl<sup>-</sup>. Para os resultados apresentados, o autor constatou que o aço AISI 444 também pode ser utilizado como alternativa aos outros aços inoxidáveis da série 300.

ALAMR et al. (2006) em sua publicação propuseram, dentre outros pontos, que a composição química de alguns aços inoxidáveis austeníticos analisados como o AISI 304L e o AISI 316L possuem uma maior suscetibilidade a quebra da película passiva que os

protegem contra a corrosão, uma vez que estão submetidos a uma ambiente ácido em que a incidência seja de até 0,2 M de cloreto. O fato é que para o aço inoxidável AISI 316L, o filme formado apresenta uma menor resistência em regiões em que o potencial é estável.

Assim, concluíram que a fração de ferro presente nesse filme passivo implica em uma menor resistência à medida que a concentração desse elemento aumenta. A referência consultada assiste o fundamento de que a composição química é um fator limitante quando se trata de afetar ou não a resistência à corrosão. Notou-se que a adição de elementos de liga como o nióbio e o titânio esboçam um padrão característico de seletividade do tipo de precipitado que se formará, uma vez que, preferencialmente, o carbono tende a ser mais estável com um desses dois elementos quando comparado ao cromo. Isso torna o aço inoxidável AISI 316 mais vantajoso. Os autores também estudaram a aplicabilidade de um terceiro aço, no qual apresentou melhores resultados para as mesmas condições quando comparado aos outros dois. A figura 18 abaixo ilustra essas informações:

Figura 18 – Cargas de fratura das películas passivas versus concentração de ferro nas películas. A liga AISI 316 é visivelmente mais fraca do que as outras.



Fonte: Alamr, Science Direct, 2006.

Machado et al. (2005) propôs em seu trabalho, entretanto, que a corrosão no aço AISI 304 quando aquecido da temperatura ambiente até a temperatura de 200 °C tende a desenvolver corrosão preferencialmente nos contornos de grão, o que gera indícios sobre um aumento na

taxa de corrosão dessa liga. O mesmo aço foi submetido a uma temperatura mais elevada, partindo da temperatura ambiente até 300 °C e foi observado que, para o seu campo de aplicação, há indícios de processos corrosivos mais severos. Esse resultado pode ter relação com o fato de que os vapores, gases e ácidos formados durante o aquecimento, ao entrarem em contato com a superfície do ácido, causam corrosão preferencial nos contornos de grão. Para o aço AISI 444, concluíram que esse aço se provou mais resistente à ataques corrosivos se comparado ao AISI 304. A adição de molibidênio, segundo a literatura, concede ao aço uma maior resistência à corrosão, dependendo do ambiente que tiver exposto. Além disso, o baixo teor de carbono com a adição de titânio, possibilita que o cromo seja estabilizado em solução sólida em ferrita, formando carbeto de titânio. De uma forma geral, constaram que o aço AISI está sujeito a um maior nível de corrosão nos contornos de grão de austenita quando submetido a elevadas temperaturas.

Schneider et al. (1990) realizaram um estudo com os aços inoxidáveis AISI 304L e 316L quando submetidos a um meio contendo cloreto. O aço 316L possuiu uma maior resistência à corrosão por pites do que o aço 304L, além de constatarem que a presença do molibidênio na liga de Fe-Cr permite que ocorra a recuperação da passividade desses aços, uma vez que formam filmes insolúveis no interior do pite, diminuindo a concentração de íons de cloro livres. Esse papel positivo do molibidênio de prevenir a corrosão nos aços inoxidáveis justamente pela atividade do cloro no pite que pode ser reduzida significativamente pela presença de precipitados de cloreto de molibidênio, possibilitando que haja a repassivação das ligas a base de ferro e cromo.

Cardoso, Jorge Luiz (2011) constatou em sua dissertação que o aço inoxidável AISI 304L teve uma maior tendência a um tipo de corrosão específico, no caso se tratava de corrosão por pite com a presença de fases consideradas deletérias justamente por condicionarem esse fenômeno, reduzindo a resistência à corrosão em regiões ou adjacências de onde são formadas. O aço 316L apresentou uma maior resistência à corrosão se comparado ao 304L, sendo mais forte contra a exposição ao íon cloreto. O aço 317L obteve um melhor desempenho comparado aos outros citados anteriormente.

A presença de molibidênio mostra que as ligas que o possuem em sua composição, como a AISI 316L, apresentam maior resistência à corrosão por pites e, conseqüentemente, o AISI 317L, por ter uma alteração ainda mais significativa em termos quantitativos de molibidênio. Os pontos de corrosão observados por ele nesse último aço foram

consideravelmente menores, muito embora houvesse constatado corrosão por frestas. O autor constatou que um terceiro aço em estudo, da família dos superausteníticos, seria uma alternativa viável para substituir as ligas estudadas, pois evidenciou que sua resistência à corrosão possui um melhor desempenho nas mesmas condições de trabalho que as outras ligas, fato observado através de sua composição química, possuindo teores de cromo, molibidênio e níquel, o que viabiliza o seu uso como um substituto aos aços inoxidáveis austeníticos da série 300 no segmento industrial de petróleo e gás.

## 7 CONCLUSÃO

As alterações nas quais os aços inoxidáveis austeníticos estão sujeitos refletem diretamente na composição química utilizada na sua produção, o tipo de tratamento térmico que foi submetido e a aplicação dessa liga, dadas as necessidades impostas pelo tipo de serviço que será destinada e as condições que estará submetida. Os aços inoxidáveis AISI da série 300 possuem um vasto campo de aplicação e estão em constante estudo para que, futuramente, novas ligas com melhores propriedades metalúrgicas e mecânicas possam substituí-los. Soluções eficientes como o acréscimo de nióbio e titânio em quantidade suficiente para que ocorra a precipitação de carbeto formados com esses elementos torna o campo de estratégia para o desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao aprimoramento das propriedades de resistência à corrosão mais vasto.

Além disso, as principais conclusões foram:

- Os tratamentos térmicos que os aços inoxidáveis austeníticos são submetidos na sua pós produção refletem um incremento gradual nas propriedades que inibem o fenômeno de sensitação, como pode ser constatado nas abordagens de algumas obras utilizadas nesse estudo;
- A composição química afeta diretamente nas propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos;
- Os tratamentos térmicos aplicados no processo de produção são bem definidos;
- Alterações no meio beneficiam determinado aço em relação a outro da mesma família austenítica;
- Existem ligas capazes de substituir os aços inoxidáveis austeníticos da série 300;
- Foi encontrado na literatura uma diversa quantidade de estudos que abordam alternativas ao aço inoxidável austenítico (ferríticos e superausteníticos, por exemplo);
- Ainda são necessários estudos para encontrar novas alternativas aos aços inoxidáveis austeníticos
- Outros aços inoxidáveis estão sendo estudados para que possam substituir os aços inoxidáveis austeníticos em suas aplicações, principalmente as que requerem elevada temperatura de operação por longos períodos.
- Alternativas no campo dos aços inoxidáveis ferríticos e superausteníticos, por exemplo, se tornam frequentes, particularmente quando se observa que muitos aços desses grupos se assemelham em termos de propriedades físicas e químicas quanto aos

aços das séries 300, austeníticos.

- A difusão desses outros aços como alternativa se mostra em uma perspectiva paupável, viabilizando a substituição de aços por outros menos difundidos, mas que obtiveram destaque perante os aços AISI 304L e AISI 316L, como foi o caso do aço AISI 444 e de outras ligas patenteadas.

Portanto, diante da temática proposta e questionada no início desse estudo, é essencial que os tratamentos térmicos sejam realizados sob condições específicas para atuarem na solubilização de precipitados formados durante as etapas de produção do produto acabado e que processos subsequentes de aplicação das ligas e aços aqui estudados sejam bem definidos, parametrizados e compatíveis com a aplicação que o material foi desenvolvido.

#### **7.1 Sugestões para trabalhos futuros:**

- Utilizar ferramentas de termodinâmica computacional, como o Thermo-Calc, para estudar os efeitos teóricos da temperatura na evolução das fases e precipitados nos aços inoxidáveis austeníticos;
- Análise computacional simulando diferentes ligas superferríticas a partir da AISI 444 com diferentes teores de molibidênio para estudar a evolução dessa liga quanto as suas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão.

## 8 REFERÊNCIAS

A. ALAMR, D.F. BAHR, MICHAEL JACROUX, Effects of alloy and solution chemistry on the fracture of passive films on austenitic stainless steel, *Corrosion Science*, Vol. 48, Pages 925-936, 2006.

A. MATEO, L. LLANES, M. ANGLADA, A. REDJAIMIA, G. METAUER, Characterization of the intermetallic G-phase in an AISI 329 duplex stainless steel. *Journal of Materials Science* 32, 1997.

A.A. OGWU, T.J. DAVIS, Improving the sensitisation resistance of ferritic stainless steels. *Scripta Materialia* 37, 1997.

A.J. SEDRIKS, *Corrosion of Stainless Steels*, Wiley Interscience Publications, 1979.

A.L. SCHAEFFLER, Constitution diagram for stainless steel weld metal. *Metal Progress*. *Metal Progress* 56, 1949.

A. SCHNEIDER and D. KURON. AES analysis of pits and passive films formed on Fe-Cr Fe-Mo and Fe-Cr-Mo alloys. *Corrosion Science*, vol 31, 1990.

ASM HANDBOOK. *Corrosion*, v.13, ASM International, 1987.

ASM INTERNATIONAL. *ASM Specialty Handbook – Stainless Steels*. First printing, J.R. Davis, Ohio pp. 3-12, Dec. 1999.

BELLEZZE, T., ROVENTI, G., QUARANTA, A. and FRATESI, R. (2008), Improvement of pitting corrosion resistance of AISI 444 stainless steel to make it a possible substitute for AISI 304L and 316L in hot natural waters. *Materials and Corrosion*, 59: 727-731, 2008

CARBÓ, H. M. *Aço Inoxidável: Aplicações e Especificações*. Acesita 2001. Disponível em: <<http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/inonx-apost-tec.pdf>>. Acessado em 05 de abril de 2020.

CARDOSO, Jorge Luiz. *Avaliação e comparação da resistência à corrosão por pites do aço super austenítico AL 6XN PLUS<sup>TM</sup> e dos aços inoxidáveis austeníticos da série AISI 304L, 316L e 317L*. Dissertação (Mestrado), UFC, Fortaleza, 2011.

CARDOSO, Jorge Luiz; SILVA NUNES CAVALCANTE, Alfredo Leão; ARAUJO VIEIRA, Regina Coeli; DE LIMA-NETO, Pedro; GOMES DA SILVA, Marcelo. Pitting corrosion resistance of austenitic and superaustenitic stainless steels in aqueous medium of NaCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Journal of Materials Research*; Warrendale Vol. 31, Ed. 12, (Jun 28, 2016)

CHIAVERINI, V., *Aços e Ferros Fundidos*, 7<sup>a</sup> ed., Publicação da Associação Brasileira de metais, 2005, pp. 359-398.

CHIAVERINI, Vicente. *Aços e ferros fundidos*. Abm, 1977.

COEMJr, Oxidação de metais. Disponível em: <<https://coemjr.com.br/blog/oxidacao-de-metais/>>. Acessado em 20 de maio de 2020.

E.C. BAIN, R.H. ABORN, J.J.B. RUTHERFORD. The nature and prevention of intergranular corrosion in austenitic stainless steels. *Transactions of the American Society for Steel Treating* 21, 1993.

FONSECA, C. S.; *Efeitos do Tratamento de Solubilização e Envelhecimento Térmico na Microestrutura e Resistência à Corrosão de uma Junta Soldada com Aço AISI 304L*. 2017. Monografia – CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2017.

GIL, A.C. *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social*. 6<sup>a</sup> ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GIMENES Jr, L. *Tratamentos térmicos aplicados a soldagem*. In: *Soldagem – Coleção tecnologia Senai*. SENAI, São Paulo, SP, 1997.

G. XIE, M. SONG, K. MITSUSHI, K. FURUYA, Orientation of  $\gamma$  to  $\alpha$  transformation in X-ray implanted austenitic 304 stainless steel. *Journal of Nuclear Materials* 281, 2000.

GENTIL, V. *Corrosão*. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

H.J. DUNDAS, A.P. BOND, IN: R. STEIGERWALD (Ed.), *Intergranular Corrosion of Stainless Steels*, ASTM, West Conshohocken, 1978.

HAMMAR O.; SVENSSON U. Influence of steel composition on segregation and microstructure during solidification of austenitic stainless steel. In: *Solidification and casting of metals*. London: The Metal Society, 1979.

INFOMET: Aços e ligas. Disponível em < <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=103>>. Acessado em 05 de maio de 2020.

INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. Disponível em: <[www.worldstainless.org](http://www.worldstainless.org)>. Acessado em 19 de maio de 2020.

INTERNATIONAL MOLYBDENIUM ASSOCIATION – IMO. Practical guidelines for the fabrication of High Performance Austenitic Stainless Steels. LondonUK, 2010.

J. BEDDOES, J.G. PARR, Introduction to Stainless Steels, 3rd edition, ASM International, Materials Park, OH, USA, 1999.

J.K.L. LAI, C.H. SHEK, K.W. WONG, Recent developments in stainless steels. Materials Science and Engineering R 65, 2009.

K.M. LEE, H.S. CHO, D.C. CHOI. Effect of isothermal treatment of SAF 2205 duplex stainless steel on migration of  $\delta/\gamma$  interface boundary and growth of austenite. Journal of Alloys and Compounds 285, 1999.

L.K. SINGHAL, J.W. MARTIN. The growth of M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> carbide on incoherent twin boundaries in austenite. Acta Metallurgica 15, 1967.

LIMA, A. S. Análise da suscetibilidade à corrosão intergranular nos aços inoxidáveis austeníticos usados em refinarias: AISI 304L, AISI 316L, AISI 321 e AISI 347, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, 2002.

LIPPOLD, J.C.; KOTECKI, D.J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels. John Wiley & Sons, Inc, 2005.

M. TERADA, D.M. ESCRIBA, I. COSTA, E. MATERNA-MORRIS, A.F. PADILHA, Investigation on the intergranular corrosion resistance of the AISI 316L(N) stainless steel after long time creep testing at 600°C. Materials Characterization 59, 2008.

MACHADO, João Paulo Sampaio Eufrásio et al . Effect of temperature on the level of corrosion caused by heavy petroleum on AISI 304 and AISI 444 stainless steel. Mat. Res., São Carlos , v. 9, n. 2, p. 137-142, June 2006 . Available from

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392006000200005&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392006000200005&lng=en&nrm=iso)>. acessado em 05 abril 2020.

MODENESI, Paulo J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. São Paulo. Centro Nacional de Tecnologia em Metalurgia. 2001

N. PARVATHAVARTHINI, R.K. DAYAL. Influence of chemical composition, prior deformation and prolonged thermal aging on the sensitization characteristics of austenitic stainless steels. *Journal of Nuclear Materials* 305, 2002.

N.J.E. DOWLING, H. KIM, J.-N. KIM, S.-K. AHN, Y.-D. LEE. Corrosion and Toughness of Experimental and Commercial Super Ferritic Stainless Steels. *Corrosion Nace International* 55, 1999.

NOVIKOV, Iia., “Teoria dos tratamentos térmicos dos metais”. Rio de Janeiro: Editora da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 568 p. 1994.

P.R. HOWELL, P.D. SOUTHWICK, R.W.K. HONEYCOMBE. The Austenite/Ferrite Interface In A Duplex Alloy Steel: Structure And Associated Diffraction Effects. *Journal of Microscopy*, 116: 151-158. 1979.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. Aços Inoxidáveis Austeníticos: microestruturas e propriedades. São Paulo: Hemus, 2004.

PADILHA, Angelo Fernando; ESCRIBA VILLANUEVA, Doris Maribel; MATERNA-MORRIS, E.; RIETH, M.; KLIMENKOV, M. Precipitation in AISI 316L(N) during creep tests at 550 and 600 C up to 10 years. *Journal of Nuclear Materials*, Amsterdam, v. 362, p. 132-138, 2007.

PALÁCIO, F.O. Efeito do Tratamento Térmico no Grau de Sensitização do Aço Inoxidável Austenítico AISI 304, avaliado por método de reativação eletroquímica potenciodinâmica na versão ciclo duplo (DL-EPR). 2007. Projeto de Graduação (Monografia) – UFES, Vitória, 2007.

PANOSSIAN, Z. Corrosão e Proteção contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas. 1 ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993.

PARDAL, J. M. Efeitos dos Tratamentos Térmicos nas Propriedades Mecânicas, Magnéticas e na Resistência a Corrosão de Aços Inoxidáveis Superduplex. Tese de Doutorado. Universidade Federal Fluminense, 2009.

PESSANHA, Ellen de Carvalho. Quantificação da ferrita delta e avaliação da relação microestrutura/propriedades de um aço inoxidável austenítico 347 soldado / Ellen de Carvalho Pessanha. – Campos dos Goytacazes, 2011. x, 95 f. : il.

PLAUT, Ronald Lesley et al . A Short review on wrought austenitic stainless steels at high temperatures: processing, microstructure, properties and performance. Mat. Res., São Carlos, v. 10, n. 4, p. 453-460, Dec. 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S151614392007000400021&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151614392007000400021&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 05 abril 2020.

R.A. LULA, Stainless Steel, American Society for Metals, 1986.

R.L. FULLMAN, A thermodynamic model of the effects of composition on the susceptibility of austenitic stainless steels to intergranular stress corrosion cracking. Acta Metallurgica 30, 1982.

SALUJA, R.; MOEED, K. M. The emphasis of phase transformations and alloying constituents on hot cracking susceptibility of type 304L and 316L stainless steel welds. International Journal of Engineering Science and Technology. v. 4, n. 5, p. 2206- 2216, 2012.

SANCHES, Leonardo Paiva. Estudo comparativo quanto a resistência à corrosão entre os aços inoxidáveis utilizados em trocadores de calor. Monografia – DEMM-POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

SCHAEFFLER A. L. Constitution diagram for stainless steel weld metal. Metal Progress, vol 56, p. 680-680B, 1949

Scientia. Ciclo dos Metais. Disponível em <<https://sites.google.com/site/scientiaestpotentiaplus/corrosao/corrosao-galvancia>> Acesado em: 22 de abril de 2020.

SEDRIKS, A. J., Corrosion of Stainless Steel, John Wiley & Sons Inc, New York,

EUA, 1996.

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

T. SOURMAIL, C.H. TOO, H.K.D.H. BHADSHIA, ISIJ. Sensitisation and Evolution of Chromium-depleted Zones in Fe-Cr-Ni-C Systems. International 43, 2003.

T. SOURMAIL, Precipitation in creep resistant austenitic stainless steels. Materials Science and Technology 17, 2001.

T.J. HEADLEY, J.A. BROOKS, A new Bcc-Fcc orientation relationship observed between ferrite and austenite in solidification structures of steels. Metallurgical and Materials Transactions A 33, 2002.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019.

W. D. CALLISTER, Ciência e engenharia de materiais, 7ª ed., Salt Lake City: LTC, 2007.

Y. USTINOVSHIKOV, B. PUSHKAREV, J. SAPEGINA, Conditions of existence of a disordered solid solution having chemical interactions between the atomic species. Journal of Alloys and Compounds 394, 2005.

Y. YAMAMOTO, M.P. BRADY, Z.P. LU, P.J. MAZIASZ, C.T. LIU, B.A. PINT, K.L. MORE, H.M. MEYER, E.A. PAYZANT. Creep-Resistant, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Forming Austenitic Stainless Steels. Science 316, 2007.