

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL

LEONARDO DE VARGAS PELLEGRINI

**LIBERAÇÃO DE ÍONS METÁLICOS POR AÇOS INOXIDÁVEIS Cr-Ni E Cr-Mn
EM MEIO ALIMENTAR SIMULADO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA POR
ABSORÇÃO ATÔMICA**

Feliz
2025

LEONARDO DE VARGAS PELLEGRINI

**LIBERAÇÃO DE ÍONS METÁLICOS POR AÇOS INOXIDÁVEIS Cr-Ni E Cr-Mn
EM MEIO ALIMENTAR SIMULADO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA POR
ABSORÇÃO ATÔMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de materiais de engenharia

Orientador: Cíntia Gabriely Zimmer

Coorientadora: Camila dos Santos Torres

FELIZ

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P386l Pellegrini, Leonardo de Vargas
Liberação de íons metálicos por aços inoxidáveis Cr-Ni e Cr-Mn em meio alimentar simulado : uma análise comparativa por absorção atômica / Leonardo de Vargas Pellegrini ; orientadora Cíntia Gabriely Zimmer ; coorientadora Camila dos Santos Torres. – Feliz, 2025.
65 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Feliz. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais. Mestrado Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais. Feliz, 2025.

1. Ciência dos materiais. 2. Aço inoxidável. 3. Resistência dos materiais. 4. Corrosão. 5. Indústria de alimentos. I. Zimmer, Cíntia Gabriely. II. Torres, Camila dos Santos. III. Título.

CDU 620.193

LEONARDO DE VARGAS PELLEGRINI

**LIBERAÇÃO DE ÍONS METÁLICOS POR AÇOS INOXIDÁVEIS Cr-Ni E Cr-Mn EM
MEIO ALIMENTAR SIMULADO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA POR
ABSORÇÃO ATÔMICA**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Matias de Angelis Korb- IFSUL

Elisabete Pinto da Silva – PARKWIND

Dr. Tarcisio Reis de Oliveira - APERAM SOUTH AMÉRICA

Orientadora: Profa. Dra. Cíntia Gabriely Zimmer – IFRS

Coorientadora: Profa. Dra. Camila dos Santos Torres - UFSM

Apresentado e aprovado em: 23, de maio de 2025.

Local da defesa: Feliz/RS

AGRADECIMENTOS

Agradeço à APERAM, em especial ao engenheiro Tiago Lima, pela doação das amostras e pelo suporte técnico fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa Compomaq, pelo apoio com os processos aplicados no acabamento das peças.

À Central de Análises da UTFPR – Campus Pato Branco, pela disponibilidade e auxílio nas análises de Espectroscopia de Absorção Atômica.

À empresa Motriz Usinagem, pelo suporte na realização dos cortes por eletroerosão das amostras.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), em especial à Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPPi), pelo apoio financeiro que viabilizou a execução deste projeto.

À minha orientadora, Prof.^a Cinthia, por toda dedicação, orientação, incentivo e pelas contribuições essenciais para a realização e aprimoramento deste trabalho.

À minha Coorientadora, Prof.^a Camila, pelas contribuições essenciais para a realização e aprimoramento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, por terem aceitado o convite de acompanhar meu trabalho.

À minha namorada, Carolina, pelo constante apoio, compreensão e incentivo em cada etapa desta jornada.

E, com enorme gratidão, à minha mãe, Zelide, pelo amor, incentivo e por sempre acreditar e motivar minha trajetória acadêmica e profissional.

RESUMO

Os aços inoxidáveis Cr-Ni, como AISI 304 e AISI 316, são amplamente utilizados na indústria alimentícia. Isso se deve à alta resistência à corrosão e à facilidade de higienização. Nos últimos anos, ligas alternativas contendo cromo e manganês (Cr-Mn) surgiram como opções mais econômicas, devido às oscilações no preço do níquel. O uso dessas ligas na fabricação de equipamentos para alimentos é recente, sendo que muitas vezes ocorre sem a devida avaliação sanitária. Além disso, algumas ligas Cr-Mn ainda não são normatizadas, contudo são frequentemente comercializadas no Brasil como se fossem equivalentes ao aço inoxidável AISI 201. Com o objetivo de verificar os riscos da aplicação de ligas Cr-Mn não normatizadas na indústria alimentícia, este trabalho avaliou o seu desempenho em comparação ao aço inoxidável Cr-Ni AISI 304, utilizando um meio simulador de ambiente alimentar. O estudo focou na liberação de íons metálicos (Fe, Cr, Mn e Ni) segundo o protocolo do Conselho da Europa (COE). A análise dos íons liberados foi realizada por espectrometria de absorção atômica. Além disso, foram realizados ensaios de corrosão, seguindo a norma ASTM G31 e a avaliação foi feita por perda de massa. A liga Cr-Mn não normatizada apresentou taxas de corrosão mais altas e maior liberação de íons metálicos, especialmente ferro e manganês, quando comparada ao AISI 304. Com base nos limites do protocolo COE, conclui-se que essa liga Cr-Mn não normatizada representa risco potencial à segurança dos alimentos. Portanto, seu uso na indústria alimentícia não é recomendado.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Indústria de alimentos; Liberação de íons metálicos; Protocolo COE; Segurança alimentar.

ABSTRACT

Cr-Ni stainless steels, such as AISI 304 and AISI 316, are widely used in the food industry due to their high corrosion resistance and ease of sanitation. In recent years, alternative alloys containing chromium and manganese (Cr-Mn) have emerged as more economical options due to fluctuations in nickel prices. The use of these alloys in the manufacturing of food processing equipment is recent and often occurs without proper sanitary assessment. Additionally, some Cr-Mn alloys are not standardized but are frequently marketed in Brazil as if they were equivalent to AISI 201 stainless steel. In order to assess the risks associated with the application of non-standard Cr-Mn alloys in the food industry, this study evaluated their performance compared to Cr-Ni stainless steel AISI 304, using a simulated food environment. The study focused on the release of metallic ions (Fe, Cr, Mn, and Ni) according to the protocol established by the Council of Europe (CoE). Ion release was analyzed using flame atomic absorption spectrometry. Corrosion tests were also conducted according to ASTM G31, with mass loss used as an evaluation parameter. The non-standard Cr-Mn alloy exhibited higher corrosion rates and greater release of metallic ions, especially iron and manganese, when compared to AISI 304. Based on the limits defined by the CoE protocol, it is concluded that the use of this non-standard Cr-Mn alloy poses a potential risk to food safety. Therefore, its application in the food industry is not recommended.

Keywords: Stainless steel; Food industry; Metallic ion release; CoE protocol; Food safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Cromo × Níquel e posicionamento das famílias dos aços inoxidáveis, com destaque para as ligas Cr-Mn de baixo teor de níquel	6
Figura 2 – Microestrutura de aço inoxidável AISI 304 (Cr-Ni) obtida por metalografia óptica, aumento de 250X.....	8
Figura 3 – Mapa-múndi dos países que mais estudam os aços inoxidáveis austeníticos Cr-Mn (quanto mais escuro o tom de azul mais pesquisas foram realizadas nesse determinado país)	11
Figura 4 – Diferenças entre o protocolo COE e a lei italiana de 1973 (ÍTALIA, 1973).....	15
Figura 5 – Resumo das principais normas que atestam segurança em contatos alimentares	17
Figura 6 – Formas indicadas e não indicadas para a fabricação de recipientes para líquidos	18
Figura 7 – Forma (a) e (b) não são indicados para construção de reservatórios, forma (c) é a ideal.....	19
Figura 8 – Geometrias corretas e incorretas para projeto de tubulações para passagem de fluidos	20
Figura 9 – Vista isométrica da peça amostral empregada neste estudo, com cotas dimensionais indicadas em milímetros	24
Figura 10 – Sequência do processo de corte das amostras	25
Figura 11 – A esquerda amostra antes de receber o corte por eletroerosão e a direita amostra cortada e polida	26
Figura 12 – Medição da Rugosidade média (R_a) de uma amostra de aço AISI 304 utilizada no experimento	26
Figura 13 – Limpeza das amostras em banho ultrassônico utilizando acetona	27
Figura 14 – Utensílios utilizados para preparar 6 litros da solução contendo 5 g/L de ácido cítrico	28
Figura 15 – Recipientes com amostras na estufa de laboratório a 40°C por 10 dias.....	29
Figura 16 – Recipientes com amostras na chapa aquecedora (foram mantidas por duas horas e depois postas em um forno a 40°C por 24 horas).....	30
Figura 17 – Recipientes com amostras na chapa aquecedora mantidas a 100°C por duas horas	30
Figura 18 – Frascos contendo as soluções após os ensaios, preparados para análise de absorção atômica.....	31
Figura 19 – Resumo dos ensaios realizados neste trabalho	32

Figura 20 - Liberação de Fe em função da razão área/volume (cm^2/mL) para o aço Cr-Mn não normatizado nos três ensaios. A linha de referência indica o limite de 40 mg/L estabelecido pelo protocolo COE.....	40
Figura 21 - Liberação de Mn em função da razão área/volume (cm^2/mL) para o aço Cr-Mn não normatizado nos três ensaios. A linha de referência indica o limite de 40 mg/L estabelecido pelo protocolo COE.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Família dos aços inoxidáveis e suas características	7
Tabela 2 - Composição química dos aços AISI 201 e AISI 304	10
Tabela 3 - Composição química e respectivas normas dos aços testados, com destaque em azul para os elementos fora dos limites especificados.	13
Tabela 4 – Lista positiva de materiais metálicos para aplicação em contato alimentar	16
Tabela 5 – Tipos de ensaio realizados em laboratório	21
Tabela 6 – Composição química dos aços testados neste estudo	23
Tabela 7 – Comprimentos de onda utilizados na quantificação de íons metálicos por espectrometria de absorção atômica (EAA).....	32
Tabela 8 – Massa das amostras antes e depois dos três ensaios realizados nas seguintes condições: Teste 1 – 10 dias a 40 °C; Teste 2 – 2 horas a 70 °C seguido de 24 horas a 40 °C; Teste 3 – 2 horas a 100 °C.	33
Tabela 9 – Taxa de corrosão de cada material para cada ensaio realizado	35
Tabela 10 – Valores de SLR para cada metal estudado neste trabalho	36
Tabela 11 – Perda de íons metálicos durante os três ensaios realizado em 5 g/L de ácido cítrico (pH = 2,2)	37
Tabela 12 – Comparação da liberação de íons metálicos (mg/L) em aços Cr-Mn da série 200 normatizados, segundo a literatura, no aço Cr-Mn sem norma e no aço Cr-Ni (AISI 304) avaliados neste estudo. Os valores deste trabalho referem-se ao Teste 02, ajustados para equivalência na razão área superficial/volume.	39

LISTA DE ABREVIATURAS

AISI	–	<i>American Iron and Steel Institute</i>
mm	–	Milímetros
MPa	–	Megapascal
ZTA	–	Zona termicamente afetada
PREN	–	<i>Pitting resistance equivalent number</i>
COE	–	<i>Conselho europeu</i>
Vol	–	<i>Volume</i>
ml	–	<i>Mililitros</i>
cm	–	Centímetros
R _a	–	Rugosidade média
µm	–	Micrometro

LISTA DE SIMBOLOS

- K Constante para conversão de unidades
- T Tempo de exposição (horas)
- A Área exposta (cm²)
- W Perda de massa (g)
- D Densidade do material exposto (g/cm³)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA.....	3
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2 Objetivos específicos	4
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS	5
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS	6
2.2.1 Aços inoxidáveis austeníticos	8
2.2.2 Aços inoxidáveis austeníticos Cr-Mn	10
2.2.3 Aços inoxidáveis austeníticos não normatizados	12
2.3 INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA.....	14
2.3.1 Normas de materiais utilizados em contato alimentar	14
2.3.2 Boas práticas para fabricação de equipamentos alimentares	17
2.4 ENSAIOS DE CORROSÃO E ANÁLISE DE DADOS	20
2.4.1 Ensaios corrosivos de perda de massa	21
2.4.2 Análise de perda de íons por espectrometria de Absorção Atômica	22
MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	23
3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	24
3.3 PREPARAÇÃO DO ENSAIO DE LIBERAÇÃO DE ÍONS METÁLICOS SEGUNDO O PROTOCOLO COE.....	27
3.4 ANÁLISE EM ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 ANÁLISE DE PERDA DE MASSA – NORMA ASTM G31.....	33
4.2 ANÁLISE DE PERDA DE ÍONS POR ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA	36

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	44

1 INTRODUÇÃO

O aço inoxidável é amplamente utilizado na indústria de alimentos devido às suas propriedades que dispensam pintura, facilitam a limpeza, permitem a higienização eficiente contra resíduos e microrganismos, e oferecem boa estabilidade química em diferentes ambientes (Mazinanian et al., 2016).

Na metalurgia, os aços inoxidáveis são classificados em cinco grupos principais: austeníticos, ferríticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação. As diferenças entre esses grupos estão, principalmente, na composição química, que influencia diretamente as fases presentes na microestrutura, o comportamento mecânico e a resistência à corrosão (krauss, 2015).

Dentre essas classes, os aços inoxidáveis austeníticos são os mais utilizados na indústria alimentícia, destacando-se por sua elevada resistência à corrosão, excelente conformabilidade e boas propriedades mecânicas (Tang; Liu; Yang, 2022). A fase austenítica, predominante nessa classe, é estabilizada à temperatura ambiente principalmente por elementos gamagênicos, como níquel, nitrogênio e manganês, embora outros elementos também possam contribuir para sua estabilidade (Hamada et al., 2013).

Os aços austeníticos são divididos em duas famílias principais: as ligas Cr-Ni, representadas pela série 300 (como o AISI 304), e as ligas Cr-Mn, representadas pela série 200, onde parte do níquel é substituído por manganês e nitrogênio (Gao; Zheng, 2015). A elevação do custo do níquel nas últimas décadas impulsionou o uso de ligas Cr-Mn como alternativas mais econômicas (Oshima; Habara; Kuroda, 2007). No entanto, a menor quantidade de níquel nessas ligas reduz significativamente sua resistência à corrosão em comparação aos aços Cr-Ni (Gaber et al., 2021).

O uso de aços inoxidáveis na indústria de alimentos é regido por normas e protocolos para avaliar a segurança desses materiais em contato com alimentos. Na Europa, destaca-se o protocolo do Conselho da Europa (COE), que utiliza ácido cítrico como simulador alimentar (Mazinanian; Wallinder; Hedberg, 2014). Nos Estados Unidos, a *National Sanitation Foundation* (NSF International) estabelece um teor mínimo de 16% de cromo para aços inoxidáveis destinados ao uso alimentar (Industrial specialties mfg. & is med specialties, 2019). No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) regulamenta os materiais por meio de uma lista

positiva, com base em sua composição química e histórico de uso seguro (ANVISA, 2024).

O AISI 304, pertencente à família Cr-Ni, é amplamente utilizado na indústria de alimentos por apresentar excelente desempenho em ambientes ácidos e por ser reconhecido por diversos protocolos de segurança alimentar (Mazinianian et al., 2016). Contudo, a substituição dessa liga por alternativas Cr-Mn tem se tornado comum devido ao menor custo. Essa substituição, no entanto, tem sido associada a problemas de corrosão e redução da vida útil de componentes (Pellegrini; Zimmer, 2024), além do risco potencial de migração de metais para os alimentos. Diante desse fato, identificou-se a necessidade de investigar a possibilidade de contaminação dos alimentos, caso ocorra a substituição de ligas Cr-Ni por ligas Cr-Mn na constituição de equipamentos utilizados na indústria alimentícia.

Um agravante é que grande parte das ligas Cr-Mn disponíveis no mercado não possui padronização normativa internacional. No Brasil, por exemplo, o aço AISI 201 — um Cr-Mn normatizado — não é comumente encontrado, e muitas vezes são comercializados aços como se fossem AISI 201 ou 204, sem que atendam de fato às especificações técnicas. Essa prática tem gerado preocupação na indústria de equipamentos, que enfrenta incertezas quanto à composição e ao desempenho desses materiais (Aperam, 2023). A escassez de estudos voltados a ligas Cr-Mn não normatizado também limita a compreensão de seus riscos e aplicações seguras (Pellegrini; Zimmer, 2024).

Diante desse contexto, este trabalho propõe a avaliação do desempenho de uma liga austenítica Cr-Mn não normatizada, presente no mercado nacional, em comparação ao aço AISI 304 (liga Cr-Ni normatizada), visando sua aplicabilidade na indústria de alimentos.

Após a realização deste mestrado, a empresa Compomaq passou a adotar práticas mais rigorosas no controle de materiais, incluindo a conferência da composição química dos lotes recebidos e a aplicação de gel decapante para auxiliar na identificação preliminar de aços da série 300. Além disso, houve um aprimoramento no conhecimento técnico sobre os aços inoxidáveis da série 200, permitindo uma seleção mais criteriosa dos materiais e maior segurança na fabricação de equipamentos destinados à indústria alimentícia.

1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

A região da Serra Gaúcha é amplamente reconhecida por seu polo metalúrgico, destacando-se cidades como Caxias do Sul, Farroupilha e Bento Gonçalves. Esta última concentra diversas empresas especializadas na fabricação de equipamentos para as indústrias alimentícia e farmacêutica, sendo referência nacional nesse segmento. Nesses equipamentos, o aço inoxidável — particularmente o AISI 304, pertencente à família Cr-Ni — é a principal matéria-prima utilizada devido à sua elevada resistência à corrosão e à comprovada conformidade com normas internacionais.

Nos últimos anos, esse cenário sofreu uma mudança significativa, principalmente durante o período da pandemia, quando houve escassez de matérias-primas e consequente aumento no custo dos materiais. Nesse contexto, surgiu no mercado uma alternativa mais acessível: um aço inoxidável austenítico de custo reduzido, por vezes comercializado com laudos técnicos que o identificavam como sendo o AISI 201. Os fabricantes passaram a adotar esse material como substituto da liga AISI 304, especialmente em partes dos equipamentos que não estavam em contato direto com os alimentos.

Com o tempo, no entanto, clientes de fabricantes desses equipamentos começaram a relatar problemas de corrosão prematura, levando à necessidade de investigação. Ensaios realizados para identificar a composição química do material corroído revelaram que, na verdade, os aços utilizados não eram do tipo AISI 201, mas sim pertenciam a uma nova série de aços inoxidáveis austeníticos sem padronização normativa. Esse cenário evidencia a importância de se avaliar cuidadosamente os riscos associados à aplicação dessas ligas, sobretudo em situações onde há contato com alimentos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a liberação de íons metálicos em solução simuladora de alimentos de acordo com o protocolo do Conselho da Europa (COE), comparando o aço inoxidável AISI 304 (Cr-Ni) com uma liga austenítica Cr-Mn não normatizada, visando a segurança de sua aplicação na indústria alimentícia.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar ensaios de perda de massa conforme a norma ASTM G31, em meio de ácido cítrico 5 g/L;
- b) Avaliar a liberação de íons metálicos seguindo o protocolo do Conselho da Europa (COE);
- c) Quantificar os íons metálicos liberados (Fe, Cr, Mn e Ni) por espectrometria de absorção atômica;
- d) Analisar comparativamente os resultados obtidos para o aço AISI 304 (Cr-Ni) e para a liga Cr-Mn sem norma;
- e) Verificar a conformidade dos resultados com os limites específicos de liberação (SLRs) definidos no protocolo COE.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Em 1913 em Sheffield na Inglaterra, Harry Brearley estava desenvolvendo estudos para encontrar um aço ideal para canos de arma. Ele testou adicionar uma considerável quantidade de cromo na liga e notou que essa adição aumentava a resistência à corrosão do material (Atlas steel, 2021). Dessa forma gerou-se a patente do aço com 9-16% de cromo, que foi chamado de *Stainless Steel* (aço sem manchas) (Cremaldi e Bhushan, 2018). Inicialmente esses aços começaram a ser usados em talheres que até aquela época eram feitos de aço carbono (Atlas steel, 2021).

Em geral, a composição dos aços inoxidáveis atualmente varia de 11 a 30% de cromo e de 0 a 31% de níquel. Outros elementos podem ser adicionados na liga dependendo da função específica aplicada (Souza, 2021).

A partir de uma concentração mínima de 10,5% de cromo na composição do aço, forma-se espontaneamente uma camada passiva de óxido de cromo (Cr_2O_3) sobre a superfície do material. Essa película, com espessura na ordem de alguns nanômetros, é responsável por proteger o aço contra diversos tipos de ataque corrosivo (Strauss et al., 2019).

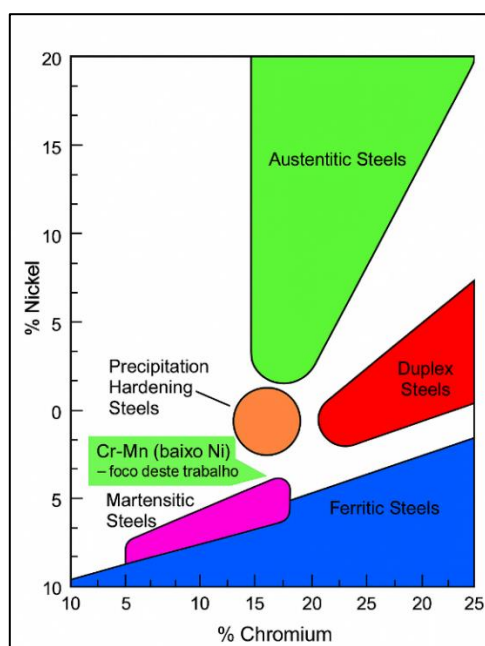
No entanto, a formação e a estabilidade dessa camada passiva são fenômenos complexos, uma vez que os aços inoxidáveis contêm múltiplos elementos de liga, cada um com influência distinta no comportamento frente à corrosão. Além disso, o desempenho da película protetora varia significativamente em função do ambiente ao qual o material está exposto, podendo apresentar diferentes características conforme o meio agressivo (Tranchida et al., 2018). Sendo assim, a composição química e a estrutura cristalina do material, tem influência na resistência à corrosão do aço inoxidável, sendo o percentual de cromo na liga o fator de maior importância (Souza, 2021).

Entre os anos de 1980 e 2022, a produção mundial de aço inoxidável cresceu a uma taxa média de aproximadamente 5,5% ao ano, superando o crescimento observado para outros metais como chumbo, cobre, alumínio, aço carbono e zinco. Esse desempenho evidencia a importância crescente dos aços inoxidáveis no cenário industrial global (World stainless, 2023).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são tradicionalmente classificados em cinco grupos: austeníticos, ferríticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação. Essa categorização baseia-se principalmente na microestrutura predominante em temperatura ambiente, determinada pela composição química da liga (Atlas steel, 2021). A Figura 1 apresenta a relação entre os teores de cromo e níquel utilizados para definir as diferentes famílias de aços inoxidáveis, destacando a posição das ligas Cr-Mn com baixos teores de níquel, foco deste trabalho, dentro da região correspondente aos aços austeníticos.

Figura 1 - Diagrama Cromo × Níquel e posicionamento das famílias dos aços inoxidáveis, com destaque para as ligas Cr-Mn de baixo teor de níquel



Fonte: Adaptado de Atlas Steel, 2021.

Os aços inoxidáveis martensíticos apresentam como microestrutura predominante a martensita e podem ser submetidos a tratamento térmico para ajuste de propriedades mecânicas. Um exemplo representativo dessa classe é o AISI 420 (Callister JR.; Rethwisch, 2016). Os aços inoxidáveis austeníticos, por sua vez,

mantêm a fase austenítica estável em temperatura ambiente devido à presença de elementos gamagênicos, como o níquel e o nitrogênio. Os tipos mais comuns dessa família são o AISI 304 e o AISI 316. Já nos aços ferríticos, como o AISI 430, a microestrutura dominante é a ferrita alfa, com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Em relação ao comportamento magnético, os aços ferríticos e martensíticos são magnéticos, enquanto os austeníticos, em sua condição normal, não apresentam magnetismo.

Além das classes austenítica, ferrítica e martensítica, também são amplamente utilizadas na indústria as classes duplex e endurecíveis por precipitação. Os aços inoxidáveis duplex apresentam em sua microestrutura uma combinação equilibrada de ferrita e austenita, o que resulta em alta resistência mecânica e à corrosão. Exemplos comuns dessa classe são os aços designados pelas normas como UNS S32205 e UNS S32750.

Já os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação destacam-se por sua elevada resistência à tração, sendo frequentemente empregados em aplicações aeronáuticas. Um exemplo típico é o aço identificado como 17-4PH, cuja designação indica aproximadamente 17% de cromo e 4% de níquel, com endurecimento promovido por tratamento térmico (Atlas steel, 2021). A Tabela 1 apresenta um resumo sobre as características gerais dessas cinco famílias de aços.

Tabela 1 - Família dos aços inoxidáveis e suas características

Família	Magnética	Taxa de trabalho a frio	Resistência a corrosão	Endurecível	Ductilidade	Soldabilidade
Austenítica	Não	Muito alta	Alta	Conformação a frio	Muito alta	Muito alta
Duplex	Sim	Média	Muito alta	Não	Média	Alta
Ferrítica	Sim	Média	Média	Não	Média	Baixa
Martensítica	Sim	Média	Média	Têmpera	Baixa	Baixa
Endurecida por precipitação	Sim	Média	Média	Envelhecimento	Média	Alta

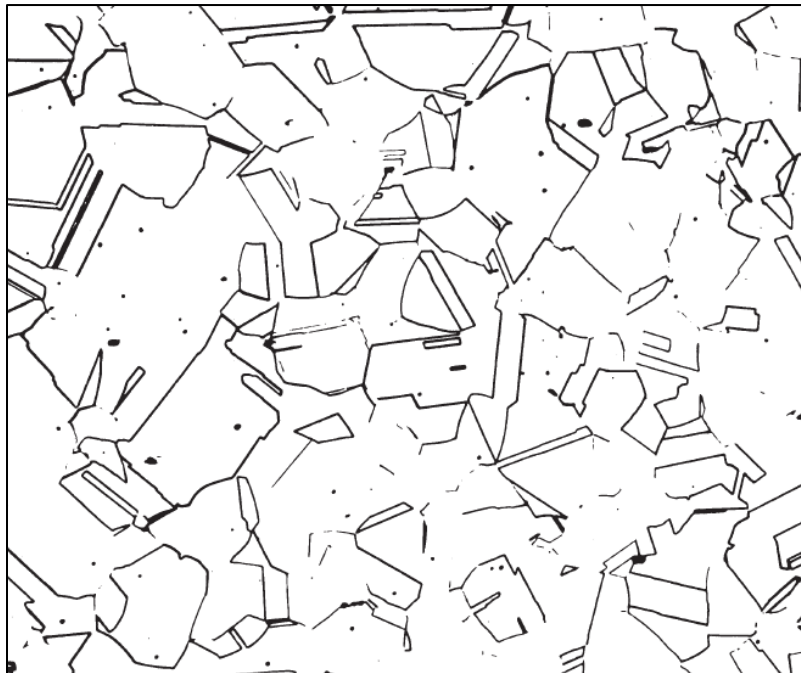
Fonte: Modificado de Atlas Steel, 2021

2.2.1 Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos surgiram a partir de estudos realizados pelos pesquisadores da empresa Friedrich Krupp AG, Dr. Brenno Strass e o Dr. Eduard Maurer. Eles trabalhavam com aços de liga cromo-níquel e iniciaram esses estudos a partir de 1910 (Sabará, 2013).

Segundo Souza (2021), os aços inoxidáveis austeníticos representam de 70 a 80% da produção mundial de aços inoxidáveis. São muito utilizados nas indústrias alimentícias, químicas, petroquímicas e aeronáuticas. Tem elevada resistência a corrosão devido ao alto percentual de cromo e níquel, geralmente acima de 16% e 6% respectivamente. O aço mais utilizado nessa classe é o AISI 304, que também é conhecido como 18/8, por ter 18% de cromo e 8% de níquel em sua composição química (Atlas steel, 2021). A Figura 2 apresenta a microestrutura austenítica de um aço AISI 304.

Figura 2 – Microestrutura de aço inoxidável AISI 304 (Cr-Ni) obtida por metalografia óptica, aumento de 250X.



Fonte: Adaptado de SMITH & HASHEMI (2013, p. 456).

A estrutura cristalina dos aços inoxidáveis austeníticos é a CFC (cúbico de face centrada), não são endurecíveis por tratamento térmico e também não são magnéticos (Sabará, 2013). Esses aços podem ser trabalhados a frio até altas faixas de limite de escoamento por possuírem elevada ductilidade e boa capacidade de encruamento (Chiaverini, 2005).

O alto teor de cromo e de níquel nesses materiais é essencial para manter a microestrutura austenítica da temperatura ambiente até a faixa de 1110°C, sem haver formação de martensita. Porém existem outros elementos estabilizadores da austenita, como por exemplo, o manganês e o nitrogênio. Esses elementos substituem parte do níquel criando assim a classe dos aços 2XX (Atlas steel, 2021).

Segundo a Index Mundi (2022), o preço por tonelada do níquel, um dos principais elementos estabilizadores da austenita, subiram mais de 100% de 2017 até meados de 2022, essa alta é explicada pela grande demanda de aços inoxidáveis no mercado chinês. Essas flutuações de valores geraram diversas pesquisas para estudar formas de substituir ou reduzir esse elemento nos aços inoxidáveis austeníticos (Souza, 2021). Pistorius e Toit (2010) complementam dizendo que o níquel é o maior responsável pelas flutuações de preços dos aços inoxidáveis austeníticos, sendo que dois terços da produção mundial de níquel primário são usados para fabricar essa categoria de aço.

Os aços inoxidáveis austeníticos podem ser divididos em duas categorias, Cr-Ni e Cr-Mn. A categoria Cr-Ni (série 300), é conhecido pela excelente capacidade anticorrosiva, já a categoria Cr-Mn (série 200) tem resistência corrosiva inferior, porém tem um custo mais baixo, devido ao menor teor de níquel na composição química (Luo; Zhao, 2013).

Na série 200 destaca-se o aço classificado pela *American Iron and Steel Institute* (AISI) AISI 201, já na série 300 destaca-se o aço AISI 304, ambos são o enfoque deste trabalho. A Tabela 2 apresenta a composição química dos aços AISI 201, AISI 201L, AISI 304 e AISI 304L segundo a norma ASTM A240/A240M.

Tabela 2 - Composição química dos aços AISI 201 e AISI 304

	C (Máx) %	Mn (Máx) %	P (Máx) %	S (Máx) %	Si (Máx) %	Cr %	Ni %	N (Máx) %
201	0,15	5,5-7,5	0,06	0,03	1	16-18	3,5-5,5	0,25
201L	0,03	5,5-7,5	0,045	0,03	0,75	16-18	3,5-5,5	0,25
304	0,07	2	0,045	0,03	0,75	17,5-19,5	8-10,5	0,1
304L	0,03	2	0,045	0,03	0,75	17,5-19,5	8-12	0,1

Fonte: ASTM A240/A240M-19.

A letra “L” após o último dígito no AISI 201L e no AISI 304L, significa *low* (Baixo em inglês), e indica que esses aços têm baixo teor de carbono na composição química. Essa redução visa diminuir a formação de carbonetos de cromo evitando assim o processo de sensitização (Mou et al., 2023). A Tabela 2 mostra que os aços AISI 201 e AISI 201L apresentam teores mais elevados de manganês e nitrogênio em comparação aos aços AISI 304 e 304L. Essa maior adição é necessária para compensar a redução de níquel, sendo que aproximadamente 1% de níquel pode ser substituído por 2% de manganês (Souza, 2021). Ainda com base na Tabela 2, observa-se que as ligas 201 e 201L possuem teor de cromo inferior ao das ligas 304 e 304L. Dessa forma, pode-se afirmar que os aços 201 apresentam menor resistência à corrosão em relação aos aços 304, uma vez que o cromo é o principal elemento responsável pela capacidade anticorrosiva desses materiais (Souza Filho et al., 2016).

2.2.2 Aços inoxidáveis austeníticos Cr-Mn

Os aços inoxidáveis austeníticos da série 200 foram desenvolvidos na década de 1930. Porém apenas na década de 1950 esses aços receberam as primeiras classificações em normas internacionais, com os aços AISI 201 e AISI 202. Essas ligas adquiriram notoriedade durante o período da Guerra da Coreia, devido à escassez de níquel, uma vez que esse metal estava predominantemente alocado para aplicações militares naquela época. Em 1970, em virtude de avanços nos processos de produção, esses aços se tornaram mais econômicos, em razão da facilidade de

relacionadas a essa liga ainda carece de estudos (Pellegrini; Zimmer, 2024). Apesar da similaridade microestrutural dos aços inoxidáveis das séries 200 e 300 há grandes diferenças na composição química de cada uma dessas famílias. Esse fator limita a substituição direta de uma liga pela outra (Gaber et al., 2021).

2.2.3 Aços inoxidáveis austeníticos não normatizados

As propriedades dos diferentes tipos de aços inoxidáveis são determinadas principalmente por seus processos de fabricação e pela composição química, esta última padronizada pela norma ASTM A240, que estabelece os percentuais mínimos e máximos de cada elemento químico (ASTM *International*, 2020). No entanto, uma parcela significativa dos aços inoxidáveis austeníticos disponíveis no mercado não segue nenhuma norma específica. Muitos desses materiais são comercializados como se fossem padronizados, como no caso de ligas vendidas como AISI 304, mas que apresentam teores de cromo e níquel significativamente inferiores aos especificados nas normativas (Aperam, 2023; Chu et al., 2021). Essa divergência pode comprometer a resistência à corrosão, gerando sérios problemas em aplicações industriais.

Além disso, esses aços não normatizados são produzidos com composições químicas próprias, definidas por cada siderúrgica de forma independente (Charles, 2005). Para manter a estrutura austenítica com menor teor de níquel, recorre-se ao aumento do teor de manganês, o que altera substancialmente diversas propriedades do material (ISSF, 2005).

Pequenos produtores no sudoeste asiático utilizando métodos de produção inferior, começaram a fabricar esse tipo de aço (Charles, 2005). Esse fato resultou na produção de aços com altos teores de enxofre e de fósforo, elementos que reduzem ainda mais a resistência à corrosão e a soldabilidade desses materiais (ISSF, 2005). Aços inoxidáveis Cr-Mn não normatizados, no geral apresentam resistência corrosiva generalizada, sob tensão, por pites, intergranular e por frestas inferiores se comparadas a aços inoxidáveis austeníticos Cr-Ni normatizados, como o AISI 304 por exemplo (Charles, 2005).

Casos de falhas envolvendo materiais com composição química fora dos padrões normativos têm sido relatados na literatura, reforçando a importância da

caracterização e da rastreabilidade dos aços inoxidáveis utilizados em aplicações críticas. Chu et al. (2021) descreveram um incidente envolvendo a ruptura de uma tubulação fabricada com um aço inoxidável comercializado como AISI 201. Após análises laboratoriais, verificou-se que a composição química do material não correspondia a nenhuma norma internacional vigente. Ensaio destrutivo realizado em meio corrosivo revelou que o colapso da tubulação foi causado pela presença excessiva de enxofre e fósforo, elementos que comprometem a resistência à corrosão.

Aperam (2023) testou aços comercializados no Brasil sob a nomenclatura AISI 201. Após análise, concluiu-se que os materiais avaliados apresentavam composição química divergente daquela especificada pelas normas internacionais. A resistência à corrosão desses aços foi comparada à do AISI 304 em diferentes meios. Os resultados demonstraram a superioridade do desempenho do AISI 304 em todos os ambientes testados, evidenciando as limitações do aço inoxidável não normatizado. A Tabela 3 apresenta a composição química dos aços utilizados nesse estudo.

Tabela 3 - Composição química e respectivas normas dos aços testados, com destaque em azul para os elementos fora dos limites especificados.

Especificação composição química AISI 304 conforme ASTM A240 / A240 M									
Cr	Ni	C	Mn	N	Cu	P	S	Mo	Si
18-20	8-11	0,08	2,00	0,10	-	0,045	0,75	-	0,75
Valores encontrados nas amostras de AISI 304									
Cr	Ni	C	Mn	N	Cu	P	S	Mo	Si
18,28	8,01	0,05	1,22	0,05	0,23	0,03	0,003	0,12	0,44
Especificação composição química AISI 201 conforme ASTM A240 / A240 M									
Cr	Ni	C	Mn	N	Cu	P	S	Mo	Si
16-18	3,5-5,5	0,15	5,5-7,5	0,25	-	0,06	0,03	-	1,00
Valores encontrados nas amostras de aço inoxidável não normatizado vendidos como "AISI 201"									
Cr	Ni	C	Mn	N	Cu	P	S	Mo	Si
12,9	1,16	0,14	9,44	0,15	0,25	0,04	0,001	0,006	0,46

Fonte: Modificado de APERAM (2023)

2.3 INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

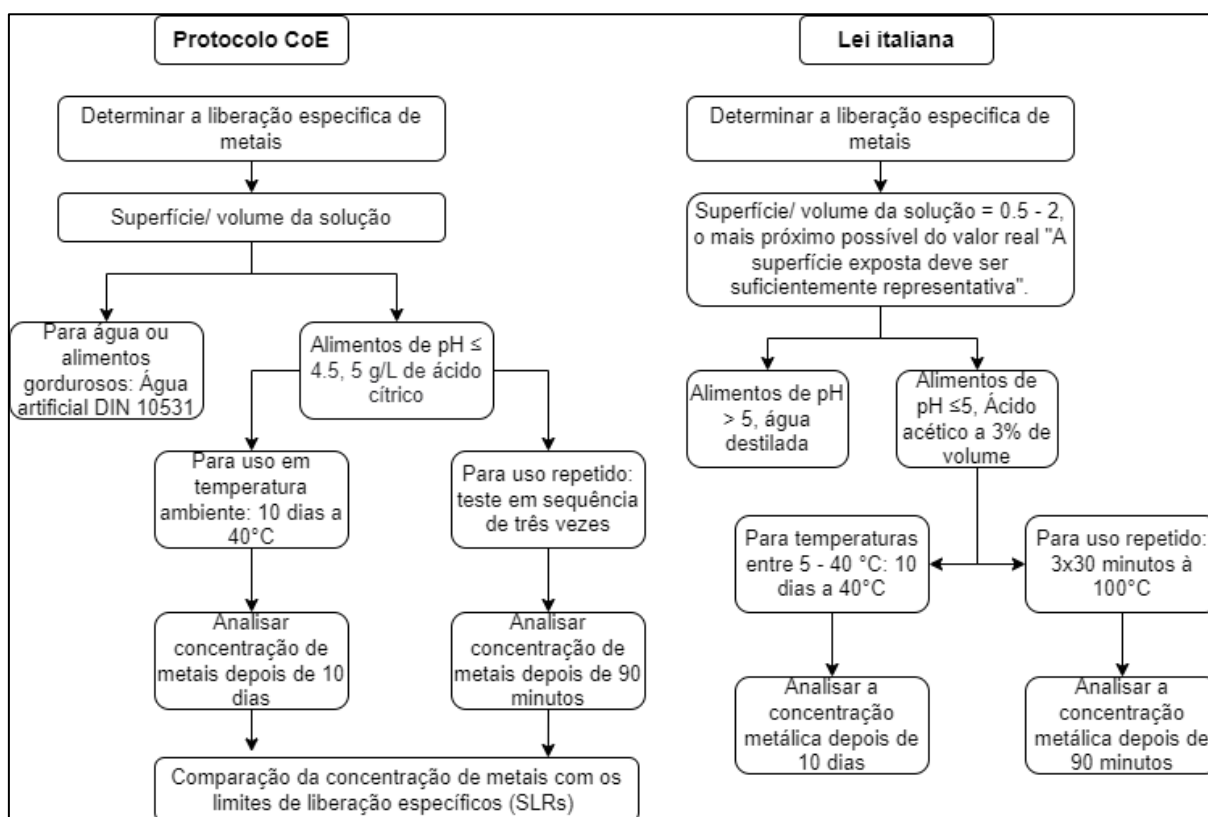
Entre os diversos metais disponíveis no mercado, o alumínio, o estanho, o cobre, o titânio e, especialmente, o aço inoxidável são amplamente utilizados na indústria alimentícia na fabricação de equipamentos e máquinas destinados ao processamento, produção, armazenamento e transporte de alimentos. Dentre os materiais mais empregados, destacam-se os aços inoxidáveis AISI 304 (UNS S30400) e AISI 316 (UNS S31600), embora outros tipos também sejam utilizados com eficácia em ambientes industriais voltados à alimentação.

A ampla aplicação dos aços inoxidáveis nesse setor se deve, principalmente, às suas excelentes propriedades de resistência à corrosão e à facilidade de higienização (BANSOD et al., 2017). Conforme a finalidade dos equipamentos, eles podem ou não entrar em contato direto com alimentos e bebidas, o que exige atenção especial na escolha do material mais adequado (PELLEGRINI; ZIMMER, 2024). Para assegurar a segurança e a qualidade dos produtos alimentícios, normas internacionais orientam a seleção do tipo apropriado de aço inoxidável em situações de contato direto com alimentos, conforme estabelecido pelo COE (2013).

2.3.1 Normas de materiais utilizados em contato alimentar

A primeira norma criada para avaliar materiais que pudessem entrar em contato com produtos alimentícios foi estabelecida a partir de um decreto ministerial na Itália, em 1973. Esse decreto informava que todo material submetido a contato alimentar deveria passar por um teste de migração de metais. O teste deveria ser realizado em água destilada, ácido acético (3% em volume) ou óleo de girassol, simulando assim ambientes alimentícios. Para ter seu uso aprovado, o material deveria apresentar níveis de migração de metais inferiores aos limites estabelecidos na norma (Itália, 1973). Em 2013, o Conselho Europeu (COE) substituiu o protocolo italiano por uma nova normativa. Dessa forma, os materiais passaram a ser submetidos a ensaios de imersão em solução de ácido cítrico (0,3% em volume, pH 2,4) ou em água artificial da torneira conforme a norma DIN 10531. Ao final do teste, a migração de metais deveria ser mensurada (COE, 2013). A Figura 4 apresenta a metodologia desses dois protocolos.

Figura 4 – Diferenças entre o protocolo COE e a lei italiana de 1973 (ÍTALIA, 1973)



Fonte: Adaptado de Mazinianian et al. (2016)

O protocolo europeu (CoE) de 2013 demonstrou ter comportamento corrosivo mais agressivo do que o protocolo italiano. Dessa forma, um material que obtenha níveis de migração de metais menores do que o permitido no protocolo de 2013 apresenta maior segurança para uso em contato alimentar do que se tivesse sido aprovado apenas pelo protocolo italiano (Mazinianian; Wallinder; Hedberg, 2014). É o caso do aço inoxidável AISI 420, que tinha seu uso permitido em contato alimentar no antigo protocolo italiano. No entanto, com o novo teste do Conselho Europeu, esse aço apresentou níveis de migração de metais acima do permitido, sendo assim, teve seu uso considerado inadequado para contato com alimentos (Mazinianian et al., 2016). Nota-se que quanto maior o teor de cromo nos aços inoxidáveis, menores são os níveis de migração de metais. Superfícies polidas apresentam menores taxas de migração de metais em comparação a superfícies com maior rugosidade (Mazinianian; Wallinder; Hedberg, 2014). Aços inoxidáveis como o AISI 202, AISI 303, AISI 304, AISI 316 e AISI 430 são aprovados para uso em contato alimentar quando submetidos

ao protocolo de testes do Conselho Europeu de 2013 (Dalipi et al., 2016). Esse protocolo é considerado o mais apropriado do mundo para avaliar a segurança de materiais em contato alimentar (World stainless, 2020).

Em 2007, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) criou uma lista de materiais que podem ser utilizados em contato com alimentos. Embora a literatura não forneça uma explicação detalhada de como essa lista foi definida, ela estabeleceu critérios para a aprovação de materiais, incluindo a recomendação de que o percentual de cobre não deve ultrapassar 1% no metal (ANVISA, 2007). Em 2024, a ANVISA revisou o regulamento, mas manteve as mesmas recomendações em relação aos materiais aprovados para uso em contato alimentar, sem alterações significativas em seus critérios, reforçando a consistência e a confiabilidade das diretrizes ao longo dos anos. A Tabela 4 apresenta a lista positiva de materiais criada pela ANVISA.

Tabela 4 – Lista positiva de materiais metálicos para aplicação em contato alimentar

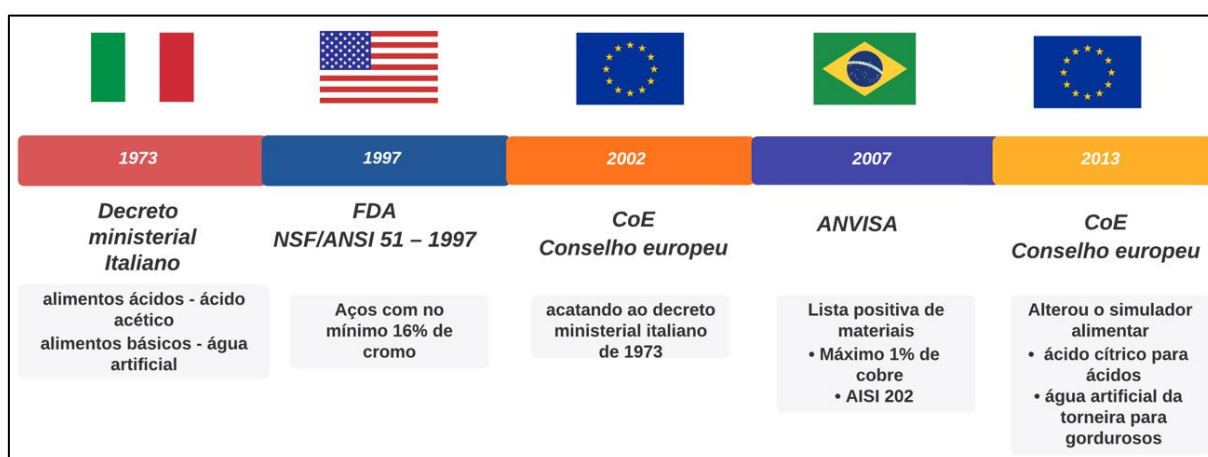
AISI	UNS	Normas EN	AISI	UNS	Normas EN
202	S 20200		416	S 41600	14.005
301	S 30100	14.310	420	S 42000	14.028
302	S 30200		430	S 43000	14.016
303	S 30300	14.305	430 F	S 43000	14.016
303 Se	S 30323		431	S 43100	14.057
304	S 30400	14.301			14.110
304L	S 30403	14.307			14.116
305	S 30500	14.303	444	S 44400	14.521
308			439	S 43035	14.510
316	S 31600	14.401		S 41050	14.003
316L	S 31603	14.404		S 32304	14.362
321	S 32100	14.541		S 31803	14.462
347	S 34700	14.550		S 32760	14.501
410	S 41000	14.006			

Fonte: ANVISA, 2024.

Nos Estados Unidos, a NSF *International* é uma instituição independente com responsabilidade na segurança alimentar. Em colaboração com o *American National Standards Institute* (ANSI), esse órgão descreve as certificações NSF/ANSI. Os requisitos mínimos de segurança para aplicação alimentar são garantidos pela norma NSF/ANSI 51 (*Industrial Specialties Mfg. & Is Med Specialties*, 2019). A norma NSF/ANSI 51 – 1997, atesta que os aços inoxidáveis das famílias AISI 2XX, AISI 3XX e AISI 4XX podem ser aplicados em meios alimentares, desde que o percentual de cromo na liga ultrapasse 16% (NSF *International*, 1997).

A Figura 5 apresenta uma linha do tempo, resumindo as definições dadas pelas normas explicadas anteriormente.

Figura 5 – Resumo das principais normas que atestam segurança em contatos alimentares



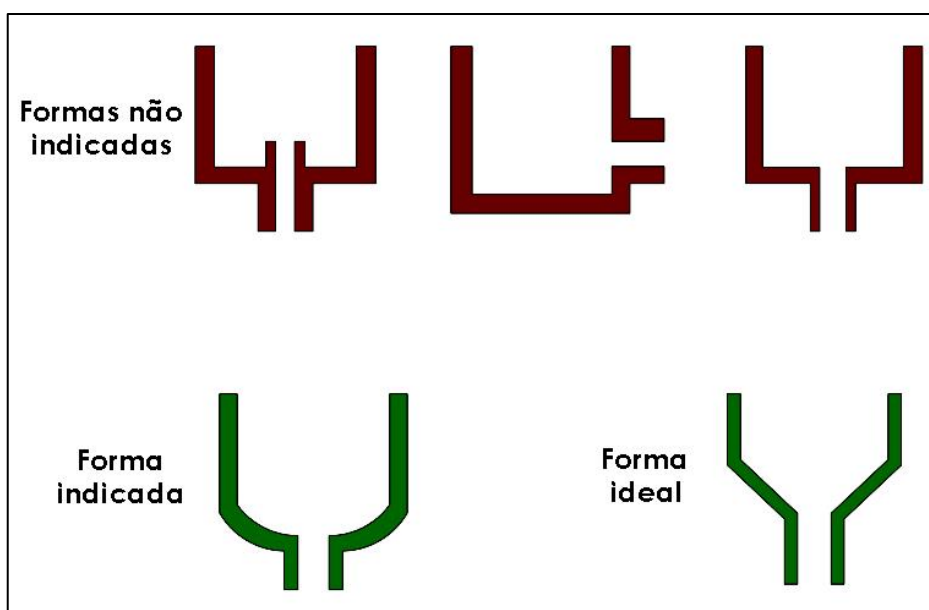
Fonte: O autor, (2024)

2.3.2 Boas práticas para fabricação de equipamentos alimentares

Alguns cuidados específicos devem ser tomados na fabricação de equipamentos para o ramo alimentício. Questões como resistência mecânica dos materiais, temperatura de trabalho e composição química do meio deve ser levada em consideração no momento do projeto desse maquinário (APERAM, 2024). Normas sanitárias também devem ser analisadas para que não haja contaminação dos materiais com o alimento (NSF *International*, 1997).

O material utilizado nesses equipamentos deve preservar suas propriedades originais mesmo após o contato prolongado com alimentos e com os compostos empregados nos agentes de limpeza. Além disso, a geometria dos componentes deve ser projetada para facilitar os processos de limpeza e sanitização. O acabamento superficial deve ser o mais liso possível, minimizando a rugosidade e evitando a presença de frestas que possam reter resíduos (NSF *International*, 1997). Recomenda-se o uso de acabamento polido para eliminar qualquer contaminação residual proveniente de processos de fabricação anteriores (Mazinanian; Wallinder; Hedberg, 2014). É imprescindível que os materiais utilizados em zonas alimentícias não contenham substâncias tóxicas, como chumbo, cádmio, arsênico ou mercúrio (NSF *International*, 1997). A Figura 6 apresenta as formas de fabricação recomendadas e não recomendadas para recipientes que contenham líquidos.

Figura 6 – Formas indicadas e não indicadas para a fabricação de recipientes para líquidos

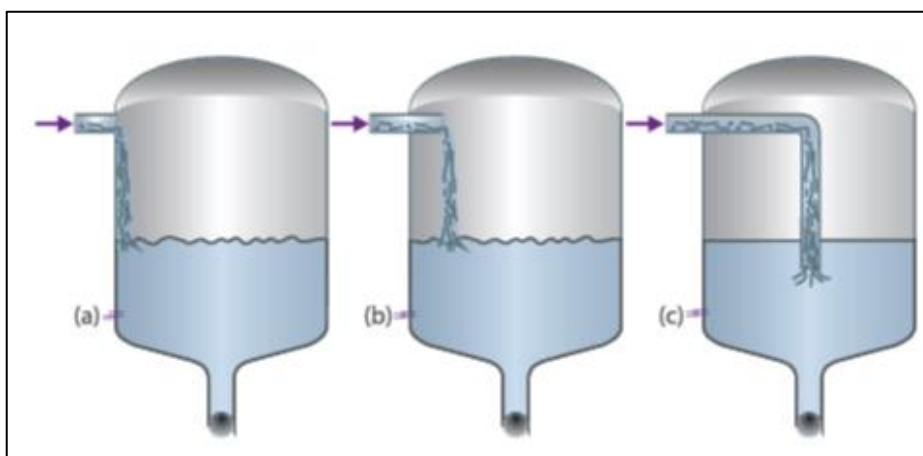


Fonte: Adaptado de Aperam, (2024)

Observando a Figura 6, é possível afirmar que os formatos indicados promovem uma drenagem mais eficiente dos líquidos, minimizando a retenção de resíduos e a formação de áreas de acúmulo e zonas de difícil acesso para a limpeza.

A Figura 7 ilustra três formatos de recipientes destinados ao recebimento de líquidos. Nos recipientes (a) e (b), observa-se que o líquido entra em contato com as paredes internas do reservatório, o que favorece a formação de depósitos de óxidos de corrosão e o desgaste acelerado do material devido ao contato direto com a superfície. Por outro lado, no recipiente (c), o líquido se mistura diretamente com o fluido já presente no reservatório, evitando o contato com as paredes laterais do tanque e, conseqüentemente, minimizando a formação de respingos e a corrosão, sendo este o formato ideal para a construção de tais equipamentos (APERAM, 2024).

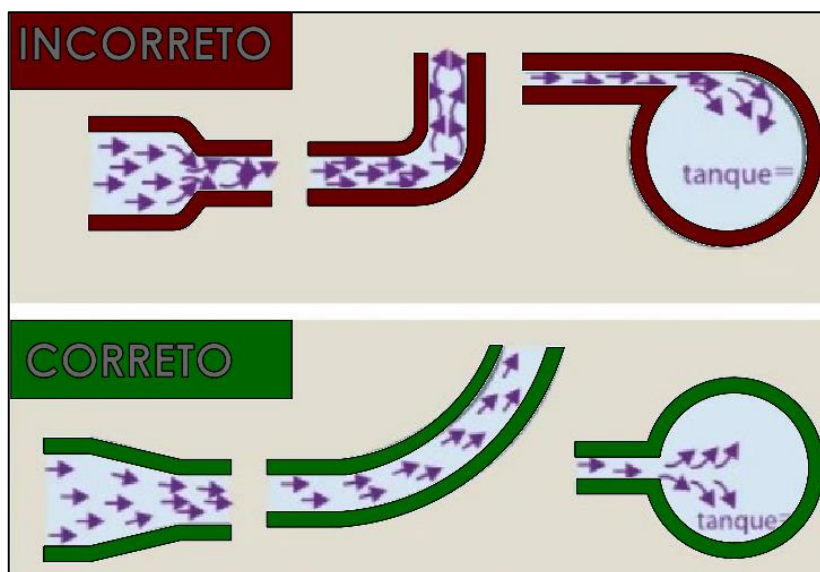
Figura 7 – Forma (a) e (b) não são indicados para construção de reservatórios, forma (c) é a ideal



Fonte: Aperam, (2024)

Cuidados devem ser tomados em tubos que contenham fluidos em movimento. Reduções bruscas de diâmetro podem provocar turbulência no escoamento do fluido. Esse fator pode provocar uma corrosão antecipada do material além do desgaste do mesmo (APERAM, 2024). A Figura 8 apresenta as geometrias incorretas e as corretas para projeto de tubulações para fluidos.

Figura 8 – Geometrias corretas e incorretas para projeto de tubulações para passagem de fluidos



Fonte: Adaptado de Aperam, (2024)

2.4 ENSAIOS DE CORROSÃO E ANÁLISE DE DADOS

Os testes de corrosão são realizados com o objetivo de estimar a agressividade de um determinado meio em um material (Gentil, 2017). Geralmente, esses testes são conduzidos em soluções aquosas, considerando que cerca de 90% dos processos de corrosão ocorrem em meios desse tipo (Wolyneq, 2003). Na prática, esse fenômeno é influenciado por diversos fatores. Dessa forma, o ideal é realizar uma variedade de testes para se aproximar do resultado real. Para garantir a reprodutibilidade, essas avaliações devem ser bem planejadas. Para isso, foram criadas normas detalhadas, a fim de evitar conclusões enviesadas (Gentil, 2017).

Essas análises podem ser realizadas em laboratório ou em campo. Nos testes laboratoriais, são definidos corpos de prova padronizados, as condições são constantes e a solução corrosiva é devidamente definida. Nesse tipo de experimento, é possível acelerar o processo de corrosão para obter resultados mais rapidamente. Esses testes são mais adequados para estudar o mecanismo de corrosão, determinar se meios de proteção são ideais para o material, estudar o efeito de impurezas em processos corrosivos e indicar o material mais adequado para determinado meio. Já

nas avaliações em campo, a amostra é exposta às condições reais de aplicação, sendo que as condições são variáveis e os resultados são alcançados após longos períodos de exposição. Recomenda-se testes de campo para estudar a efetividade de proteções anticorrosivas e estimar a durabilidade aproximada do material em determinado meio (Gentil, 2017).

2.4.1 Ensaios corrosivos de perda de massa

Os testes laboratoriais são realizados sob uma variedade de condições, com o objetivo de simular aquelas encontradas durante a utilização dos materiais (Gentil, 2017). Este trabalho focará nos testes de imersão, que são padronizados por normas internacionais, sendo regidos pela norma ASTM G31. A Tabela 5 apresenta os tipos de ensaios corrosivos com a sua respectiva utilidade.

Tabela 5 – Tipos de ensaio realizados em laboratório

Tipo de Ensaio	Utilidade
Imersão contínua	Avaliação da resistência à corrosão em condições estáticas e contínuas de imersão.
Imersão alternada	Simulação de ciclos de imersão e secagem, representando variações de umidade.
Imersão contínua, com agitação	Estudo do efeito de movimentos constantes sobre a taxa de corrosão em soluções corrosivas.
Ensaio com fluxo contínuo	Análise da corrosão em condições de fluxo constante, simulando ambientes dinâmicos.
Ensaio com líquidos em ebulição	Avaliação da resistência à corrosão em líquidos sob altas temperaturas, imitando condições extremas.
Ensaio com líquidos a temperaturas elevadas e pressões elevadas	Teste da resistência à corrosão em condições de temperatura e pressão extremas.
Ensaio de corrosão conjugados às solicitações mecânicas	Estudo da interação entre corrosão e tensões mecânicas aplicadas ao material.
Ensaio de corrosão conjugados a pressões elevadas e altas velocidades de corrente	Análise da corrosão sob condições de alta pressão e altas velocidades de fluido.
Cabine de umidade, podendo-se combiná-la com variações de temperaturas	Simulação de ambientes de alta umidade, com variação de temperatura, para avaliação da corrosão em ambientes úmidos.
Cabine de umidade com dióxido de enxofre	Teste da resistência à corrosão em ambientes com presença de poluentes, como dióxido de enxofre.
Cabine de névoa salina	Avaliação da resistência à corrosão em condições de névoa salina, simulando ambientes marinhos.

Fonte: Adaptado de Gentil, (2024)

Os resultados desses ensaios podem ser avaliados por observação visual, perda ou ganho de massa, desprendimento de hidrogênio, observação microscópica, alteração de resistência elétrica do material, métodos eletroquímicos entre outros (Wolyneq, 2003). Uma forma bastante usual de mensurar a taxa de corrosão é avaliar a massa antes do ensaio e diminuir o valor da massa após o ensaio. Dessa forma estima-se um valor em milímetros por ano (mm/ano), simbolizando a perda de espessura anual de determinado material em algum meio corrosivo (Gentil, 2017).

2.4.2 Análise de perda de íons por espectrometria de Absorção Atômica

A Espectrometria de Absorção Atômica (EAA) é uma técnica analítica utilizada na análise quantitativa de metais traço, com elevada sensibilidade e seletividade. No contexto de avaliação da corrosão de aços inoxidáveis, a EAA permite quantificar com precisão os íons metálicos liberados em meios líquidos, fornecendo dados confiáveis sobre a degradação do material em diferentes condições de exposição (Skoog et al., 2014; Welz & Sperling, 2008).

O princípio da EAA baseia-se na absorção de radiação eletromagnética por átomos livres no estado gasoso. Quando uma amostra contendo metais é introduzida em uma chama, os átomos metálicos são excitados e absorvem luz em comprimentos de onda específicos para cada elemento. A intensidade dessa absorção é diretamente proporcional à concentração do metal na amostra (Harris, 2011).

A escolha dos comprimentos de onda adequados para cada elemento é essencial para garantir a especificidade da análise, minimizando interferências espectrais e químicas. Além disso, a calibração do equipamento com padrões certificados permite traçar curvas analíticas precisas, fundamentais para a quantificação confiável dos íons metálicos. No caso deste estudo, foram adotados padrões mono-elementares para Fe, Cr, Ni e Mn, assegurando a exatidão dos resultados obtidos e a reprodutibilidade entre diferentes medições. A aplicação da EAA neste contexto se mostra particularmente eficaz por sua capacidade de detectar concentrações na faixa de partes por milhão (ppm), o que é crucial na avaliação da integridade de aços inoxidáveis submetidos a processos corrosivos (Harris, 2011; Welz & Sperling, 2008).

MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo desta pesquisa é avaliar a viabilidade e segurança da aplicação de dois aços inoxidáveis austeníticos em ambientes alimentares: o aço inoxidável austenítico Cr-Ni (AISI 304) e um aço inoxidável austenítico Cr-Mn (não normatizado). A investigação será conduzida com base no protocolo europeu COE, amplamente reconhecido como o mais adequado para esse tipo de análise. Os métodos empregados na análise serão detalhados ao longo deste capítulo.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

As amostras de aço inoxidável AISI 304 utilizadas nos ensaios foram gentilmente fornecidas pela empresa APERAM. As amostras de aço inoxidável Cr-Mn, por sua vez, foram adquiridas de uma empresa importadora de aços chineses. A análise de composição química revelou que esse material não atende aos requisitos estabelecidos pela norma ASTM A240/A240M, apresentando menores teores de Cromo e níquel que qualquer aço inoxidável existente na norma, caracterizando-o como fora dos padrões internacionais. No presente trabalho, esse material será referido como aço Cr-Mn não normatizado. Ambas as amostras vieram inicialmente com acabamento superficial 2B, laminado a frio, recozido, decapado, e processado via Skin-Pass (laminador de encruamento c/ cilindro brilhante). A Tabela 6 apresenta a composição química exigida pela norma e a medida por espectrometria de emissão óptica no IPT (Instituto de Pesquisa e Tecnologia de São Paulo).

Tabela 6 – Composição química dos aços testados neste estudo

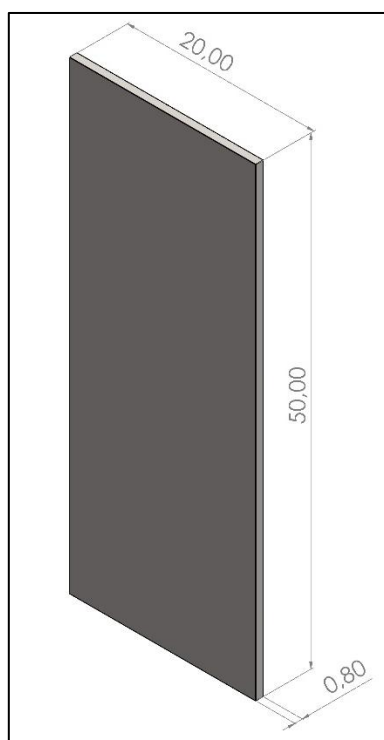
Valores encontrados nas amostras de aço inoxidável Cr-Ni (AISI 304)									
Cr	Ni	C	Mn	N	Cu	P	S	Mo	Si
18,28	8,01	0,05	1,22	0,05	0,23	0,03	0,003	0,12	0,44
Valores encontrados nas amostras de aço inoxidável Cr-Mn não normatizado									
Cr	Ni	C	Mn	N	Cu	P	S	Mo	Si
12,9	1,16	0,14	9,44	0,15	0,25	0,04	0,001	0,006	0,46

Fonte: O autor, 2025

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras de ambos os tipos de aço foram retiradas aleatoriamente de chapas com dimensões de 3000 mm x 1500 mm e espessura de 0,8 mm. Para extrair peças de 100 mm x 50 mm, utilizou-se uma guilhotina. Essas amostras foram enviadas ao autor deste trabalho. Para os ensaios de perda de metal, estabeleceu-se um tamanho de amostra de 50 mm x 20 mm conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Vista isométrica da peça amostral empregada neste estudo, com cotas dimensionais indicadas em milímetros

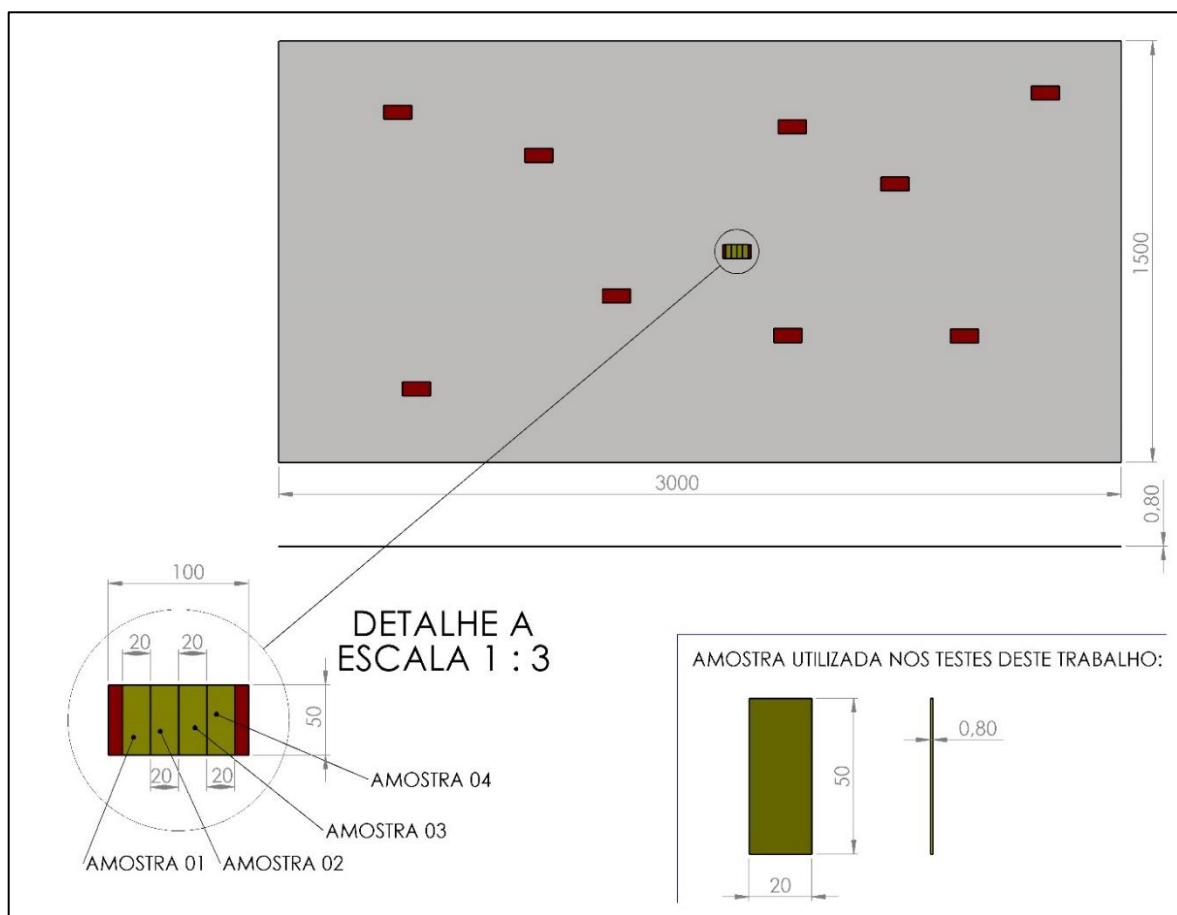


Fonte: O autor, (2025)

Para evitar o aquecimento das superfícies cortadas e garantir a precisão dimensional, as peças com dimensões finais foram seccionadas em um equipamento de eletroerosão a fio de molibdênio (marca Baoma modelo FW400). Em seguida, foram selecionadas aleatoriamente 20 amostras com as dimensões especificadas. Esse procedimento de seleção aleatória foi adotado para minimizar o risco de se utilizar amostras com características específicas decorrentes da localização na chapa.

A Figura 10 ilustra o processo de retirada das amostras, bem como as dimensões de cada etapa.

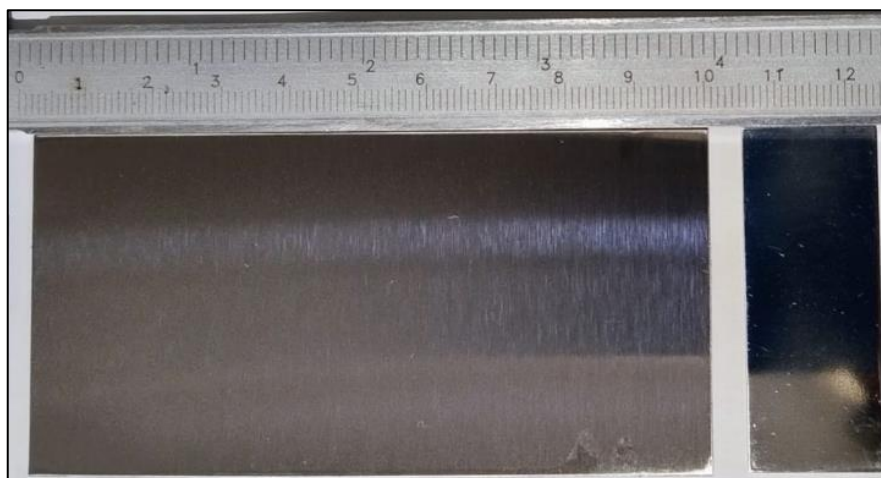
Figura 10 – Sequência do processo de corte das amostras



Fonte: O autor, (2025)

As amostras foram enviadas à empresa Compomaq, fabricante de máquinas de envase, para que o processo de polimento fosse realizado em todas as suas faces. A Compomaq aplicou o mesmo nível de polimento espelhado sanitário utilizado em equipamentos de envase de bebidas com uma rugosidade média (R_a) inferior a $0,1 \mu\text{m}$. Esse procedimento foi escolhido com o objetivo de simular de forma mais realista as condições de uso do material em um ambiente real de envase. A Figura 11 apresenta, à esquerda, a amostra antes do corte por eletroerosão e, à direita, a amostra com as dimensões finais, já cortada e polida.

Figura 11 – A esquerda amostra antes de receber o corte por eletroerosão e a direita amostra cortada e polida



Fonte: O autor, (2024)

Após o processo, a rugosidade de cinco amostras aleatórias foi medida utilizando um rugosímetro portátil digital da marca Digimes (modelo 400.200). Na indústria de alimentos, recomenda-se que as superfícies em contato com alimentos apresentem uma rugosidade R_a inferior a $0,1 \mu\text{m}$ (Food Safety Brazil, 2015). Assim, os valores de rugosidade média obtidos foram $0,068 \mu\text{m} \pm 0,005 \mu\text{m}$ para as amostras de aço AISI 304 e $0,098 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ para as amostras do aço inoxidável Cr-Mn não normatizado. As medições foram realizadas tanto no sentido transversal como também no sentido longitudinal da peça. A Figura 12 apresenta a medição de uma dessas amostras.

Figura 12 – Medição da Rugosidade média (R_a) de uma amostra de aço AISI 304 utilizada no experimento



Fonte: O autor, (2024)

3.3 PREPARAÇÃO DO ENSAIO DE LIBERAÇÃO DE ÍONS METÁLICOS SEGUNDO O PROTOCOLO COE

Este estudo adotou o protocolo do Conselho da Europa (COE) por oferecer um simulador ácido mais representativo das condições reais de sanitização em indústrias alimentícias, por ser amplamente referenciado como 'melhor-prática' em normas europeias e por permitir comparações diretas com importante parte da literatura especializada (Mazinanian; Wallinder; Hedberg, 2014).

O ensaio de perda de metais seguiu com rigor a diretriz técnica do ensaio de liberação de metais do COE (COE, 2013). Esse tópico irá detalhar todo o procedimento.

Após o polimento, todas as amostras foram submetidas a limpeza em banho ultrassônico de 40 minutos, utilizando acetona grau analítico (Neon Produtos Analíticos). A Figura 13 ilustra as amostras posicionadas na cuba ultrassônica durante a limpeza.

Figura 13 – Limpeza das amostras em banho ultrassônico utilizando acetona

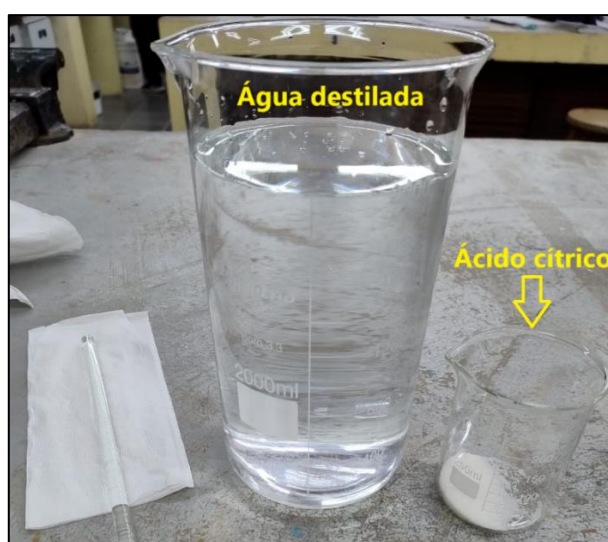


Fonte: O autor, (2024)

O protocolo especifica a utilização de uma solução de ácido cítrico na concentração de 5 g/L como simulador alimentar. Para o preparo da solução, foram utilizados 6 litros de água destilada ($\text{pH} = 6,11$) e 30 gramas de ácido cítrico de grau analítico, fornecido pela empresa Dinâmica Química Contemporânea LTDA. Após o preparo, o pH final da solução foi medido em um pH metro de bancada (modelo LUCA-210) resultando em um valor de 2,17, com precisão de 95,32%. Todos os frascos e

utensílios utilizados no preparo da solução foram previamente limpos com acetona, enxaguados três vezes com água destilada e deixados para secar à temperatura ambiente. Após a secagem, todas as amostras foram pesadas em uma balança analítica de precisão de 0,001 g da marca EVEN. A Figura 14 mostra os utensílios utilizados no preparo da solução.

Figura 14 – Utensílios utilizados para preparar 6 litros da solução contendo 5 g/L de ácido cítrico



Fonte: O autor, (2024)

Determinou-se uma relação de 20 mL de simulador por centímetro quadrado de área amostral. Assim, foram utilizados 200 mL de simulador para cada amostra com 20 cm². Seguindo o protocolo, foram realizados três ensaios, cada um contendo três amostras, além de uma solução sem amostra, denominada teste em branco. O objetivo do teste em branco é identificar possíveis interferências ou reações inesperadas que possam influenciar os resultados, permitindo assim a correção desses efeitos na análise final e aumentando a precisão e confiabilidade dos dados. As temperaturas utilizadas nos ensaios são definidas pelo protocolo COE (COE, 2013).

O primeiro ensaio consistiu em expor as amostras a solução simuladora aquecida a 40 °C por 10 dias, utilizando uma estufa de laboratório da marca SOLAB. Os recipientes contendo a solução simuladora e as amostras foram vedados com plástico filme para minimizar perdas por evaporação. Para garantir a constância do

volume da solução, água destilada foi reposta regularmente, conforme recomendado no protocolo COE. Na Figura 15 é possível observar os recipientes contendo as amostras colocadas na estufa de laboratório. Foram testadas três amostras de aço AISI 304, três amostras de aço inoxidável Cr-Mn não normatizado e dois frascos contendo apenas a solução de simulador (teste em branco).

Figura 15 – Recipientes com amostras na estufa de laboratório a 40°C por 10 dias



Fonte: O autor, (2024)

No segundo ensaio, as amostras foram aquecidas a 70 °C por 2 h em chapa aquecedora da marca EVEN (modelo DB-IVA) e, em seguida, mantidas por 24 h a 40 °C em estufa de laboratório SOLAB. Em ambos os procedimentos, as amostras permaneceram imersas em béqueres com 200 mL de solução de ácido cítrico 5 g/L. Os frascos foram fechados com filme plástico para reduzir a evaporação e água destilada foi adicionada regularmente para manter a taxa de proporção da solução. Os recipientes contendo as amostras colocadas na chapa aquecedora são apresentados na Figura 16. Foram testadas três amostras de aço AISI 304, três amostras do aço inoxidável Cr-Mn não normatizado e dois frascos contendo apenas a solução de simulador (teste em branco).

O terceiro ensaio ocorreu a 100°C por 2 horas. Da mesma maneira como nos dois primeiros testes as amostras foram colocadas nos béqueres contendo 200 mL de solução e vedadas com filme plástico para diminuir a evaporação. Houve também a adição de água destilada para manter a taxa de proporção da concentração da

solução. Para aquecer o líquido foi utilizada uma chapa aquecedora da marca EVEN (modelo DB-IVA). A Figura 17 mostra os recipientes com as amostras dispostas na chapa aquecedora. Foram testadas três amostras de aço AISI 304, três amostras de aço inoxidável Cr-Mn não normatizado e dois frascos contendo apenas a solução simulante (teste em branco).

Figura 16 – Recipientes com amostras na chapa aquecedora (foram mantidas por duas horas e depois postas em um forno a 40°C por 24 horas)



Fonte: O autor, (2024)

Figura 17 – Recipientes com amostras na chapa aquecedora mantidas a 100°C por duas horas



Fonte: O autor, (2024)

Amostras de água destilada (pH = 6,11) também foram testadas, sendo mantidas por 10 dias a 40 °C, com o objetivo de verificar a ausência de contaminação metálica proveniente da água utilizada nos ensaios.

3.4 ANÁLISE EM ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

Após o período estipulado para os ensaios, as amostras foram retiradas da solução, secas e pesadas novamente na mesma balança analítica de precisão previamente utilizada com o objetivo de determinar a taxa de corrosão conforme a norma ASTM G31. Após o resfriamento à temperatura ambiente, a solução remanescente foi transferida para um frasco reagente de polietileno. O frasco, devidamente lacrado, foi enviado para a Central de Análises da universidade tecnológica federal do Paraná (UTFPR) para a análise dos íons metálicos dissolvidos na solução.

A análise foi realizada em um espectrômetro de absorção atômica por chama da marca Perkin Elmer (modelo Pinaacle 900T). Os elementos selecionados para a análise foram Ferro (Fe), Cromo (Cr), Manganês (Mn) e Níquel (Ni). Os frascos contendo a solução de teste antes de serem enviadas para análise de espectrometria de absorção atômica, são apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Frascos contendo as soluções após os ensaios, preparados para análise de absorção atômica



Fonte: O autor, (2024)

A Tabela 7 ilustra o funcionamento simplificado da técnica e os comprimentos de onda utilizados na análise de cada metal.

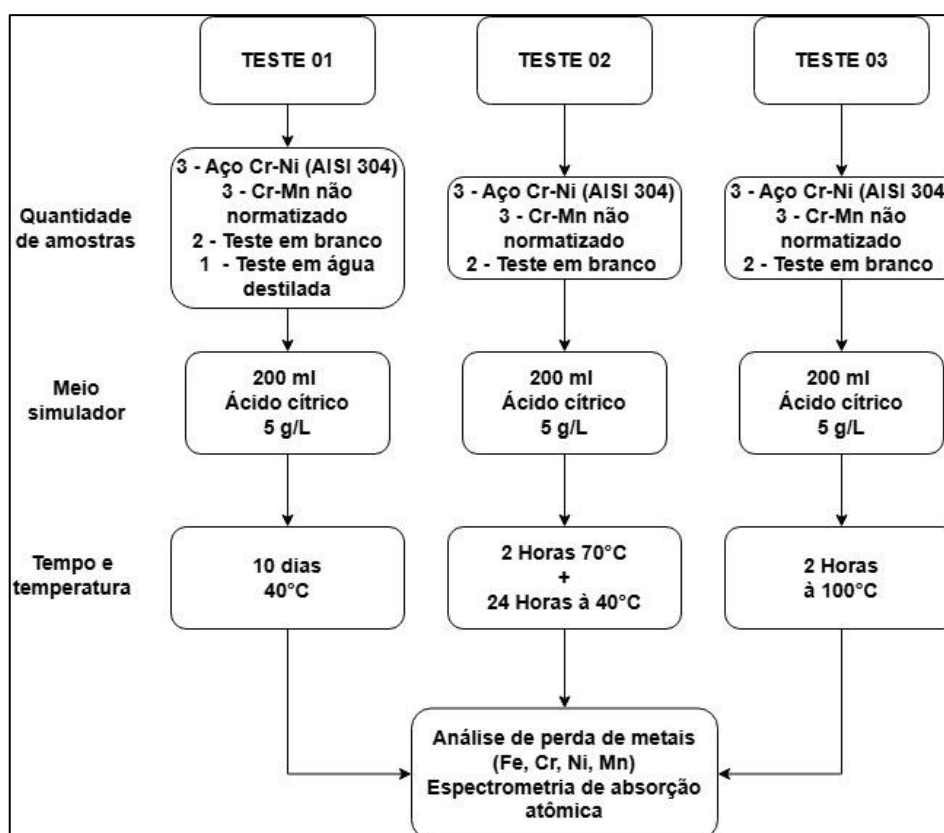
Tabela 7 – Comprimentos de onda utilizados na quantificação de íons metálicos por espectrometria de absorção atômica (EAA)

Metal	Comprimento de onda (nm)	Lâmpada (mA)	Gás combustível (Ar + Acetileno)
Fe	248,3	10	Chama rica (reduzida)
Cr	357,9	10	Chama oxidante
Ni	232,0	10	Chama rica
Mn	279,5	10	Chama rica

Fonte: Adaptado de Harris (2011); Welz & Sperling (2008).

A Figura 19 resume os três ensaios realizados.

Figura 19 – Resumo dos ensaios realizados neste trabalho



Fonte: O autor, (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DE PERDA DE MASSA – NORMA ASTM G31

A Tabela 8 apresenta a massa das amostras antes e depois dos ensaios em ácido cítrico 5 g/L.

Tabela 8 – Massa das amostras antes e depois dos três ensaios realizados nas seguintes condições: Teste 1 – 10 dias a 40 °C; Teste 2 – 2 horas a 70 °C seguido de 24 horas a 40 °C; Teste 3 – 2 horas a 100 °C.

Teste 01 - 10 dias à 40°C			
Aço Cr-Mn não normatizado			
Amostra	Massa Inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)
Amostra 01	6,1352	6,1350	0,0002
Amostra 02	6,1811	6,1753	0,0058
Amostra 03	6,1812	6,1801	0,0011
Média	6,1658	6,1635	0,0024
Desvio padrão	0,0217	0,0202	
Aço Cr-Ni (AISI 304)			
Amostra	Massa Inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)
Amostra 01	3,7470	3,7478	Houve ganho de massa
Amostra 02	3,7303	3,7288	0,0015
Amostra 03	3,732	3,7332	Houve ganho de massa
Média	3,7364	3,7366	Houve ganho de massa
Desvio padrão	0,0075	0,0081	
Teste 02 - 2 horas à 70°C seguido de 24 horas a 40°C			
Aço Cr-Mn não normatizado			
Amostra	Massa Inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)
Amostra 01	6,1995	6,1988	0,0007
Amostra 02	6,1296	6,129	0,0006
Amostra 03	6,1735	6,1726	0,0009
Média	6,1675	6,1668	0,0007
Desvio padrão	0,0288	0,0288	
Aço Cr-Ni (AISI 304)			
Amostra	Massa Inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)
Amostra 01	3,7019	3,7020	Houve ganho de massa
Amostra 02	3,7369	3,7372	Houve ganho de massa
Amostra 03	3,7278	3,7277	0,0001
Média	3,7222	3,7223	Houve ganho de massa
Desvio padrão	0,0148	0,0149	

Continua

Teste 03 - 2 horas à 100°C			
Aço Cr-Mn não normatizado			
Amostra	Massa Inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)
Amostra 01	6,1714	6,1712	0,0002
Amostra 02	6,1751	6,1744	0,0007
Amostra 03	6,1623	6,1620	0,0003
Média	6,1696	6,1692	0,0004
Desvio padrão	0,0054	0,0053	
Aço Cr-Ni (AISI 304)			
Amostra	Massa Inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)
Amostra 01	3,7084	3,7093	Houve ganho de massa
Amostra 02	3,7487	3,7485	0,0002
Amostra 03	3,7589	3,7589	0
Média	3,7387	3,7386	0,0001
Desvio padrão	0,0218	0,0262	

Fonte: O autor, 2025

Com base nos resultados da Tabela 8 e considerando a precisão da balança analítica utilizada (0,001 g), observa-se que somente as amostras de aço inoxidável Cr-Mn não normatizada apresentaram perdas de massa que, em alguns casos, ultrapassaram o limite de detecção do equipamento. Em contrapartida, as variações nas massas das amostras de aço Cr-Ni (AISI 304) foram inferiores ou iguais à sensibilidade da balança, sendo consideradas desprezíveis do ponto de vista experimental. Dessa forma, pode-se inferir que, nas condições testadas, o aço Cr-Mn foi mais suscetível à degradação no meio simulado. A taxa de corrosão foi então calculada conforme a norma ASTM G31 (Equação 1), com os resultados apresentados na Tabela 9.

$$\text{Taxa de corrosão} = (K \times W) \div (A \times T \times D) \quad (1)$$

Onde:

K = Constante para conversão de unidades

T = Tempo de exposição (horas)

A = Área exposta (cm²)

W = Perda de massa (g)

D = Densidade do material exposto (g/cm³)

Tabela 9 – Taxa de corrosão de cada material para cada ensaio realizado

Teste 01 - 10 dias à 40°C	
Material	Taxa de corrosão (mm/ano)
Aço Cr-Mn não normatizado	0,011
Aço Cr-Ni (AISI 304)	Abaixo do limite de detecção da balança (0,001 g)
Teste 02 - 2 horas à 70°C seguido de 24 horas a 40°C	
Material	Taxa de corrosão (mm/ano)
Aço Cr-Mn não normatizado	0,030
Aço Cr-Ni (AISI 304)	Abaixo do limite de detecção da balança (0,001 g)
Teste 03 - 2 horas à 100°C	
Material	Taxa de corrosão (mm/ano)
Aço Cr-Mn não normatizado	0,220
Aço Cr-Ni (AISI 304)	Abaixo do limite de detecção da balança (0,001 g)

Fonte: O autor, 2025

A maior taxa de corrosão observada nas amostras de aço inoxidável Cr-Mn não normatizado pode ser atribuída ao menor teor de cromo nesta liga em comparação ao aço AISI 304, além do elevado teor de manganês característico dos aços inoxidáveis Cr-Mn (Vashishtha et al., 2017).

Observou-se também um aumento progressivo na taxa de corrosão com a elevação da temperatura nos ensaios. O Teste 3, realizado a 100 °C, apresentou taxa de corrosão mais elevada do que o Teste 1, conduzido a 40 °C. Esse comportamento está alinhado aos princípios da cinética química, segundo os quais o aumento da temperatura acelera a taxa das reações, aumentando a reatividade do meio. Além disso, em temperaturas mais altas, há maior dissociação do ácido cítrico, que passa a se comportar como um ácido mais forte. Essa maior concentração de íons H⁺ intensifica o ataque ao aço inoxidável, favorecendo os processos corrosivos (Vashishtha et al., 2017).

Nenhuma das amostras apresentou sinais de corrosão a olho nu. Esse resultado está em conformidade com os diversos estudos da literatura, que investigaram a exposição de aços inoxidáveis austeníticos a soluções contendo o mesmo simulador alimentar utilizado neste trabalho (Mazinanian; Wallinder; Hedberg, 2014) (Mazinanian et al., 2016). O acabamento superficial das amostras também

exerce influência significativa na resistência à corrosão. Amostras com superfície polida, como as utilizadas neste estudo, tendem a apresentar menor suscetibilidade à corrosão quando comparadas a superfícies com maior rugosidade, como acabamentos escovados ou não polidos. Isso ocorre porque o polimento reduz as irregularidades da superfície, dificultando a adesão de contaminantes e a formação de microambientes corrosivos (Aperam, 2024).

4.2 ANÁLISE DE PERDA DE ÍONS POR ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

Após a análise por espectrometria de absorção atômica, as concentrações de metais liberados nos ensaios deste estudo foram comparadas com os limites específicos de liberação (*Specific Release Limits* – SLRs) estipulados no protocolo COE (COE, 2013). Esse protocolo baseia seus critérios em informações toxicológicas, dados de ingestão oral de alimentos em diversos países europeus, diretrizes de órgãos nacionais de avaliação de risco e dados específicos de liberação (Mazinian; Wallinder; Hedberg, 2014). Os SLRs dos metais estudados neste trabalho estão apresentados na Tabela 10, sendo valores definidos com base em dados de ingestão oral de alimentos, avaliações toxicológicas e diretrizes de órgãos internacionais de segurança alimentar.

Tabela 10 – Valores de SLR para cada metal estudado neste trabalho

Metal	SRL (mg/kg)	Valores baseados em:
Fe	40	Dados disponíveis de ingestão oral
Cr	0,25	Dados disponíveis de ingestão oral
Mn	1,8	Valores de referência toxicológicos
Ni	0,14	Valores de referência toxicológicos

Fonte: O autor, 2025

Dessa forma, se o valor de SLR encontrado na análise do material for menor que o estipulado na Tabela 10, o material é considerado seguro para uso alimentar. No entanto, a relação entre a área superficial exposta e o volume da solução deve ser considerada, pois a perda de íons metálicos aumenta linearmente com a área em

contato com a solução (Mazinianian; Wallinder; Hedberg, 2014). (Mazinianian et al., 2016) (Dalipi et al., 2016). Sendo assim, um material pode ser aprovado em uma determinada taxa de solução, mas reprovado quando testado em uma razão significativamente maior.

O protocolo COE não define uma taxa específica para a análise. Entretanto, neste estudo, adotou-se a proporção de 0,05 cm² de área amostral por mL de solução, conforme recomendado pela norma ASTM G31. em conformidade com a norma ASTM G31. Alguns autores utilizaram a relação de 1 cm²/mL para representar o pior caso possível na utilização de aços inoxidáveis em utensílios alimentares, um valor 20 vezes maior do que o adotado neste trabalho (Mazinianian; Wallinder; Hedberg, 2014; Mazinianian et al., 2016). A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos após a realização dos ensaios descritos neste trabalho.

Tabela 11 – Perda de íons metálicos durante os três ensaios realizado em 5 g/L de ácido cítrico (pH = 2,2)

	Fe (mg/L)	Cr (mg/L)	Ni (mg/L)	Mn (mg/L)
Valor SRL	40	0,25	0,14	1,8
Limite de detecção (LD)	0,08	0,10	0,06	0,01
Teste 01 - 10 dias à 40°C				
Aço Cr-Mn não normatizado	0,43 ± 0,05	N.D*	N.D*	0,05 ± 0,01
AISI 304	0,30 ± 0,05	N.D*	N.D*	N.D*
Teste em branco	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*
Teste 02 - 2 horas à 70°C seguido de 24 horas a 40°C				
Aço Cr-Mn não normatizado	0,59 ± 0,03	N.D*	N.D*	0,08 ± 0,04
AISI 304	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*
Teste em branco	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*
Teste 03 - 2 horas à 100°C				
Aço Cr-Mn não normatizado	2,04 ± 0,04	N.D*	N.D*	0,32 ± 0,06
AISI 304	0,31 ± 0,07	N.D*	N.D*	0,008 ± 0,001
Teste em branco	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*

N.D*= Não detectado, concentração inferior ao limite de detecção (LD).

Fonte: O autor, 2025

Embora os valores de liberação de íons metálicos apresentados na Tabela 11 aparentem ser baixos, é importante destacar que esses resultados foram obtidos

utilizando uma razão área superficial/volume de simulante relativamente baixa (0,05 cm²/mL). Quando esses dados são extrapolados para condições mais críticas, com maiores relações de área superficial por volume — cenário comum em equipamentos industriais —, os níveis de liberação tendem a se aproximar dos limites específicos de liberação (SLRs) estabelecidos pelo protocolo COE. Esse comportamento será demonstrado nas Tabelas 20 e 21, as quais simulam essas configurações mais severas.

A análise da Tabela 11 evidencia a liberação preferencial de íons Fe e Mn em comparação aos íons Cr e Ni nos três ensaios e para ambos os materiais testados. Esses resultados estão em concordância com achados da literatura que investigaram a liberação de íons em aços inoxidáveis austeníticos expostos à solução recomendada pelo protocolo COE. O ferro tende a ser liberado preferencialmente em soluções com pH inferior a 7,5. Já o manganês apresenta maior liberação em materiais com altos teores desse elemento, frequentemente associados a menores concentrações de níquel, como observado por Mazinanian, Wallinder e Hedberg (2014), Mazinanian et al. (2016) e Dalipi et al. (2016).

O teste realizado a 100°C apresentou os maiores níveis de liberação, indicando que o aumento da temperatura influencia diretamente a liberação de íons metálicos. Esses resultados estão em concordância com os achados da literatura (Yang et al., 2022) (Mazinanian et al., 2016). A elevação da temperatura intensifica a tendência de formação de pites, favorecendo a liberação de metais induzida por ligantes que alteram o equilíbrio químico (Mazinanian et al., 2016).

O único ensaio que não seguiu essa tendência foi o realizado no aço AISI 304, submetido a aquecimento por 2 horas a 70°C, seguido de 24 horas a 40°C. Nesse caso, não houve liberação de metais acima do limite de detecção para nenhum dos elementos testados. Esse resultado já foi observado na literatura envolvendo esse mesmo tipo de aço. Alguns materiais, quando submetidos por determinado período de tempo a uma certa temperatura em soluções ácidas, podem apresentar uma pré-passivação, o que aumenta o teor de cromo na camada passiva e reduz a liberação de metais em até 27 vezes (Mazinanian; Wallinder; Hedberg, 2014).

Conforme observado na Tabela 11, o aço AISI 304 apresentou níveis de liberação de metais substancialmente menores em comparação ao aço Cr-Mn não normatizado em todas as condições testadas. No ensaio conduzido a 100°C por duas

horas, a liberação de Fe no aço Cr-Mn foi seis vezes superior à do AISI 304, enquanto a liberação de Mn foi 40 vezes maior. Evidências da literatura corroboram a relação entre o maior teor de cromo na liga e a redução da liberação de elementos como Fe, Ni e Mn, devido à formação de uma camada passiva mais estável e resistente à corrosão (Mazinanian; Wallinder; Hedberg, 2014).

Estudos anteriores indicam que o aço AISI 304 tende a apresentar níveis de liberação de metais similares aos de aços normatizados da série 200, como o AISI 201 e 204 como observado por Mazinanian, Wallinder e Hedberg (2014), Mazinanian et al. (2016) e Dalipi et al. (2016). No entanto, o aço Cr-Mn não normatizado apresentou um desempenho significativamente inferior em comparação aos aços normatizados. A Tabela 12 apresenta uma comparação entre os níveis de liberação de metais em aços normatizados da série 200, conforme dados reportados na literatura, e os valores obtidos para a liberação de íons metálicos no aço Cr-Mn não normatizado analisado neste estudo (MAZINANIAN; WALLINDER; HEDBERG, 2014).

Para viabilizar a comparação com os dados da literatura apresentados na Tabela 12, os resultados obtidos no Teste 02 (realizado a 70 °C por 2 horas, seguido de 24 horas a 40 °C) foram ajustados. Esse ajuste consistiu na multiplicação dos valores por um fator de 20, a fim de igualar a razão entre a área superficial da amostra e o volume do simulador utilizado no estudo de referência. No caso do aço Cr-Ni (AISI 304), cujos resultados ficaram abaixo do limite de detecção, os valores do próprio limite de detecção foram multiplicados pelo mesmo fator, representando o pior cenário possível.

Tabela 12 – Comparação da liberação de íons metálicos (mg/L) em aços Cr-Mn da série 200 normatizados, segundo a literatura, no aço Cr-Mn sem norma e no aço Cr-Ni (AISI 304) avaliados neste estudo. Os valores deste trabalho referem-se ao Teste 02, ajustados para equivalência na razão área superficial/volume.

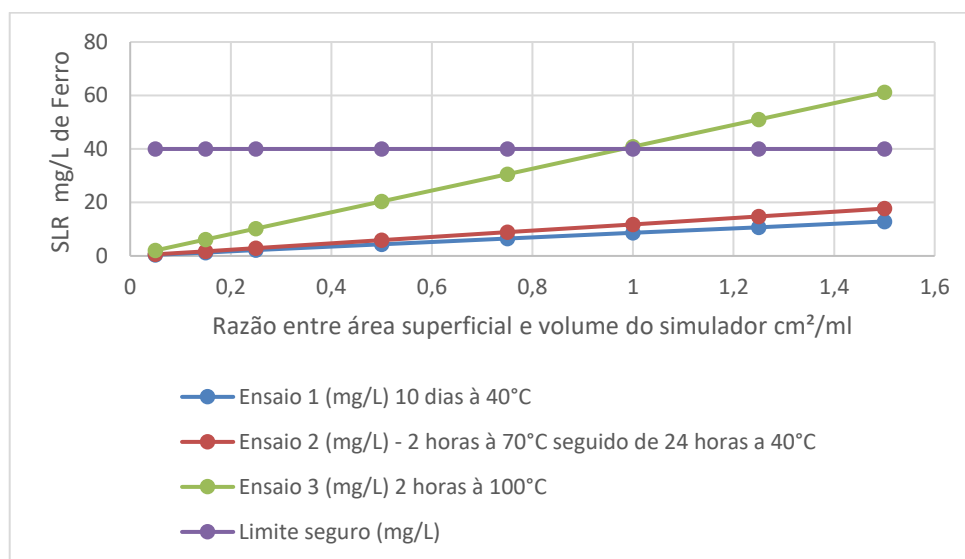
Liga	Norma	Íons liberados Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Referência
Cr-Mn	Sem norma	11,7	1,6	(Presente trabalho)
Cr-Mn	AISI 201	1,8	0,13	(Mazinanian; Wallinder; Hedberg, 2014)
Cr-Mn	AISI 204	2,2	0,35	(Mazinanian; Wallinder; Hedberg, 2014)
Cr-Ni	AISI 304	1,6	0,2	(Presente trabalho)

Fonte: O autor, 2025

Conforme observado na Tabela 12, o aço Cr-Mn não normatizado apresentou níveis de liberação de Fe e Mn significativamente superiores aos dos aços normatizados AISI 201 e AISI 204. Em comparação com o AISI 201 — material com o qual é frequentemente confundido na indústria — a liberação de Fe foi 6,5 vezes maior e a de Mn, 12,3 vezes maior.

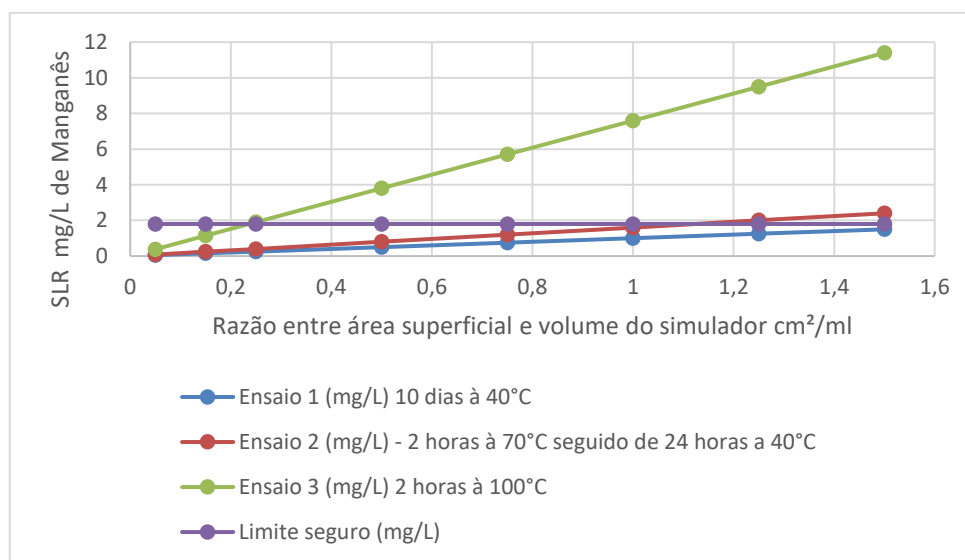
Conforme discutido anteriormente, a razão entre área superficial e volume do simulador exerce influência direta sobre os níveis de liberação de íons metálicos. A Figura 20 apresenta a variação da liberação de ferro em função dessa razão, indicando o limite a partir do qual os valores ultrapassam o estabelecido pelo protocolo COE. De forma equivalente, a Figura 21 mostra os resultados obtidos para o manganês.

Figura 20 - Liberação de Fe em função da razão área/volume (cm^2/mL) para o aço Cr-Mn não normatizado nos três ensaios. A linha de referência indica o limite de 40 mg/L estabelecido pelo protocolo COE.



Fonte: O autor, (2025)

Figura 21 - Liberação de Mn em função da razão área/volume (cm^2/mL) para o aço Cr-Mn não normatizado nos três ensaios. A linha de referência indica o limite de 40 mg/L estabelecido pelo protocolo COE.



Fonte: O autor, (2025)

A Figura 20 apresenta os resultados da liberação específica de ferro (SLR) em função da razão entre área superficial e volume do simulador para os três ensaios realizados com o aço da Cr-Mn não normatizado. Observa-se que os Ensaios 1 e 2 mantêm os níveis de liberação de Fe abaixo do limite seguro estabelecido pelo protocolo COE (40 mg/L) até a razão de aproximadamente $1,5 \text{ cm}^2/\text{mL}$. Já o Ensaio 3 ultrapassa esse limite a partir de uma razão próxima de $1,0 \text{ cm}^2/\text{mL}$, indicando maior tendência à liberação de ferro sob essas condições.

A Figura 21 ilustra a liberação de manganês (Mn) nas mesmas condições experimentais. Novamente, os Ensaios 1 e 2 apresentam desempenho seguro em toda a faixa de razão avaliada, com valores consistentemente abaixo do limite de segurança. O Ensaio 3, no entanto, mostra uma liberação crescente e ultrapassa o limite seguro a partir da razão de $0,4 \text{ cm}^2/\text{mL}$, evidenciando um comportamento mais crítico para o manganês.

Considerando que, em instalações industriais, especialmente em tubulações de processos na indústria de alimentos, a razão entre área superficial e volume de simulador pode atingir valores da ordem de $1,6 \text{ cm}^2/\text{mL}$, os resultados obtidos neste estudo indicam uma limitação significativa para o uso do aço Cr-Mn não normatizado

nessas aplicações. Como demonstrado nas Figuras 20 e 21, os níveis de liberação de Fe e Mn ultrapassam os limites seguros definidos pelo protocolo COE a partir de uma razão de aproximadamente $0,4 \text{ cm}^2/\text{mL}$ — especialmente no Ensaio 3, condição crítica comumente encontrada em processos de sanitização de equipamentos em plantas industriais. Dessa forma, o uso desse material em contato direto com alimentos em processos industriais pode representar um risco à segurança alimentar, inviabilizando sua aplicação sem garantias adicionais de desempenho ou conformidade com normas específicas.

Outro aspecto relevante é a maior perda de massa observada para esse aço em comparação ao AISI 304 (Tabela 9), o que pode comprometer a durabilidade de tratamentos superficiais como o polimento, que são aplicados justamente para melhorar a resistência à corrosão. Além disso, esse tipo de aço, ao ser submetido a processos de conformação, tende a apresentar uma maior susceptibilidade à corrosão sob tensão, principalmente em função do elevado teor de manganês presente na liga (APERAM, 2023). Dessa forma, em condições reais de uso na indústria, os níveis de liberação de íons metálicos podem ser ainda superiores aos obtidos neste estudo experimental.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam diferenças expressivas entre o desempenho do aço inoxidável Cr-Mn não normatizado e o aço Cr-Ni AISI 304 frente à exposição ao ácido cítrico 5 g/L, tanto em termos de perda de massa quanto de liberação de íons metálicos.

Com base na norma ASTM G31, observou-se que apenas o aço Cr-Mn não normatizado apresentou taxas de corrosão mensuráveis, as quais aumentaram de forma acentuada com o incremento da temperatura, atingindo o valor máximo de 0,220 mm/ano no ensaio a 100 °C. O aço AISI 304, por sua vez, não apresentou perdas de massa relevantes em nenhuma das condições testadas, demonstrando excelente resistência à corrosão.

A análise da liberação de íons metálicos, conforme os critérios do protocolo COE, revelou a predominância da liberação de Fe e Mn em ambas as ligas, com destaque para o aço Cr-Mn não normatizado, que apresentou concentrações de liberação superiores aos aços normatizados da série 200 encontrados na literatura. No ensaio mais severo (100 °C), a liberação de Fe e Mn foi, respectivamente, 6 e 40 vezes maior que no AISI 304. Além disso, a relação entre área superficial e volume da solução demonstrou forte influência sobre os níveis de liberação, com risco potencial de ultrapassagem dos limites estabelecidos pelo protocolo COE em configurações mais críticas.

Esses resultados indicam que o aço inoxidável Cr-Mn não normatizado apresenta desempenho inferior em ambientes simulando contato com alimentos ácidos, tanto em resistência à corrosão quanto na segurança alimentar, devido à maior liberação de elementos metálicos potencialmente tóxicos. Assim, sua aplicação em ambientes alimentares não é recomendada.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento do aço Cr-Mn não normatizado sem norma em condição soldada, aplicando o protocolo COE, a fim de investigar a influência do processo de soldagem na liberação de íons metálicos;
- Estudar o desempenho do aço Cr-Mn não normatizado sem norma em condição conformada, segundo o protocolo COE, considerando possíveis alterações microestruturais e sua correlação com a migração de elementos;
- Realizar ensaios com o aço Cr-Mn não normatizado utilizando uma razão superficial de 1,5 cm²/mL em simulador, visando uma aproximação mais realista com condições industriais típicas da área de alimentos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução RDC no 20, de 22 de março de 2007. **Utensílios, Tampas e Equipamentos Metálicos em Contato com Alimentos**". Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 mar. 2007. Disponível em: https://anvisa.gov.br/legis/ato/ato.php?acao=abrirTextoAto&tipo=RDC&numeroAto=00000854&seqAto=000&valorAno=2007&orgao=RDC/DC/ANVISA/MS&codTipo=&desItem=&desItemFim=&cod_menu=1696&cod_modulo=134&pesquisa=true

APERAM (Brasil); INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Comparativo Inox 304 x Inox 201: Ensaio de corrosão em água sanitária (Hipoclorito de sódio a 2,5%). *In: Cuidados com "Série 200" (1% Níquel)*. [S. l.], 14 ago. 2023. Disponível em: <https://inoxdeverdade.com.br/ensaio-de-corrosao-em-agua-sanitaria/>. Acesso em: 28 jan. 2024.

APERAM. **Aços inoxidáveis Aperam: resistência garantida, testada e comprovada**. [S. l.], 2024. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/biblioteca/A%C3%A7os%20inoxid%C3%A1veis%20Aperam%20-%20Resist%C3%Aancia%20garantida,%20testada%20e%20comprovada.pdf](https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/biblioteca/A%C3%A7os%20inoxid%C3%A1veis%20Aperam%20-%20Resist%C3%Aancia%20garantida,%20testada%20e%20comprovada.pdf). Acesso em: 26 fev. 2024.

APERAM. **Aços inoxidáveis: Aplicações e especificações**. 1. 1. ed. [S. l.], 16 mar. 2024. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.aperamservicos.com.br/wp-content/uploads/2020/09/Caderno1.pdf](https://www.aperamservicos.com.br/wp-content/uploads/2020/09/Caderno1.pdf). Acesso em: 16 mar. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A240/A240M-20**: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. 2020. Disponível em:

https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CA0240_A0240M-23%7Cen-US. Acesso em: 08/10/2023.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM G31-72: Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals.* West Conshohocken, PA: ASTM International, 2004.

ATLAS STEEL. Stainless Steel Grade Selection The Good, The Bad & Ugly Decisions to be Made. **Atlas Steel**, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://atlassteels.com.au/wp-content/uploads/2021/08/Stainless-Steel-Grade-Selection-The-Good-The-Bad-Ugly-Decisions-to-be-Made-12-08-21.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2024.

BANSOD, A. V.; PATIL, A. P.; MOON, A. P.; SHUKLA, Sourabh. Microstructural and Electrochemical Evaluation of Fusion Welded Low Nickel and 304 ASS at Different Heat Input. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [s. l.], v. 26, ed. 12, p. 5847–5863, 15 nov. 2017. DOI 10.1007/s11665-017-3054-3. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-017-3054-3>. Acesso em: 25 jan. 2024.

BATISTA, S. R. F.; KURIB, S. E.; GONÇALVES, R. S. Considerações Sobre PREN (Pitting Resistance Equivalent Number) E Fase Sigma Na Resistência À Corrosão De Um Aço Inoxidável Dúplex. **Intercorr - ABRACO**, [s. l.], 2014. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2014/INTERCORR2014_134.pdf. Acesso em: 26 fev. 2024.

CALLISTER JR, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CHARLES, Jacques. The new 200-series: An alternative answer to Ni surcharge? Dream or nightmare?. **Proc. of the Fifth Stainless Steel Science and Market Congress**, [s. l.], 2005. Disponível em: www.euro-inox.org 24.02.2010. Acesso em: 8 out. 2023.

CHIAVERINI, V., **Aços e Ferros Fundidos**, 7. ed. Publicação da Associação Brasileira de metais, 2005, pp. 381-440.

CHU, K.H. et al. Chloride stress corrosion cracking of a non-standard, 'Borderline' Chromium-Manganese stainless steel –Problems of counterfeits and substandard materials. **Engineering Failure Analysis**, [s. l.], v. 127, 23 jun. 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105562>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630721004234>. Acesso em: 14 jan. 2024.

COE, 2013. Council of Europe, Metals and alloys used in food contact materials and articles, a practical guide for manufacturers and regulators, ISBN: 978-92-871-7703-2. European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare (EDQM).

CREMALDI, J.; Bhushan, B. "Fabrication of bioinspired, self-cleaning superliquiphilic/phobic stainless steel using different pathways", **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 518, p. 284-297, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.02.034>

DAI, Peiyuan *et al.* A new numerical model to predict welding-induced sensitization in SUS304 austenitic stainless steel joint. **Journal of materials research and technology**, [s. l.], v. 17, p. 234-243, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422000151>. Acesso em: 14 jan. 2024.

DALIPI, R.; BORGES, L.; CASAROLI, A.; BONIARDI, M.; FITTSCHEN, U.; TSUJI, K.; DEPERO, L.E. Study of metal release from stainless steels in simulated food contact by means of total reflection X-ray fluorescence. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 173, p. 85-91, 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.045>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877415300467>. Acesso em: 10 mar. 2024.

FOOD SAFETY BRAZIL. **Critérios para projeto sanitário de equipamentos**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://foodsafetybrazil.org/criterios-para-projeto-sanitario-de-equipamentos/>. Acesso em: 18 nov. 2024.

GABER, G. A.; MOHAMED , L. Z.; JÄRVENPÄÄ, Antti; HAMADA, Atef. Enhancement of corrosion protection of AISI 201 austenitic stainless steel in acidic chloride solutions by Ce-doped TiO₂ coating. **Surface & Coatings Technology**, [s. l.], v. 423, 14 ago. 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127618>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897221007921>. Acesso em: 24 jan. 2024.

GAO, Yuxin; ZHENG, Shaomei. Effect of plasma nitriding temperatures on characteristics of aisi 201 austenitic stainless steel. **Surface Review and Letters**, [s. l.], v. 23, ed. 1, 6 out. 2015. DOI 10.1142/S0218625X15500845. Disponível em: <https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S0218625X15500845>. Acesso em: 24 jan. 2024.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. atual. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 1191 p. ISBN 978-85-216-1779-2.

HAMADA, A.S. et al. Contribution of deformation mechanisms to strength and ductility in two Cr–Mn grade austenitic stainless steels. **Materials Science & Engineering A**, [s. l.], v. 559, p. 336-344, 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.108>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509312012415>. Acesso em: 24 jan. 2024.

HARRIS, Daniel C. *Análise química quantitativa*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. INDUSTRIAL SPECIALTIES MFG. & IS MED SPECIALTIES. **Food Safety Regulations and Food Contact Materials**. 17. ed. [S. l.], 2019. Disponível em: www.industrialspec.com/images/files/food-contact-materials-fda-nsf-and-other-standards.pdf. Acesso em: 10 mar. 2024.

INTERNATIONAL STAINLESS STEEL FORUM (ISSF). **ISSF - International Stainless Steel Forum. ISSF - International Stainless Steel Forum**, 2020.

Disponível

em: https://www.worldstainless.org/Files/issf/nonimagefiles/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Figures_2020_English_public_version.pdf Acesso em: 24 jan. 2024.

ISSF. "New 200 series" steels: An opportunity or a threat to the image of stainless steel. ISSF, [s. l.], 2005.

ITÁLIA. [Constituição (21/09/1973)]. **Hygienic conditions of packaging, containers and articles intended to come into contact with foodstuffs or with substances of human use.**: Decreto ministeriale. [S. l.: s. n.], 1973. Disponível em: <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC009972>. Acesso em: 10 mar. 2024.

KRAUSS, G. Steels: Heat treatment and processing principles. **Materials Park: ASM International**, 2015.

LIU, Guangming; LIU, Yuanyuan; CHENG, Yawen; LI, Jin; JIANG, Yiming. The Intergranular Corrosion Susceptibility of Metastable Austenitic Cr–Mn–Ni–N–Cu High-Strength Stainless Steel under Various Heat Treatments. **Materials**, [s. l.], v. 12, ed. 9, 2019. DOI 10.3390/ma12091385. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31035439/>. Acesso em: 11 fev. 2023.

LUO, H.S.; ZHAO, C. Low temperature salt bath hardening of AISI 201 austenitic stainless steel. **Physics Procedia**, [s. l.], 2013.

MAZINIANIAN, N.; WALLINDER, I. O.; HEDBERG, Y. Comparison of the influence of citric acid and acetic acid as simulants for acidic food on the release of alloy constituents from stainless steel AISI 201. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 145, p. 51-63, 23 ago. 2014. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.08.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877414003367>. Acesso em: 28 jan. 2024.

MAZINANIAN, N.; HERTING, G.; WALLINDER, I. O.; HEDBERG, Y. Metal release and corrosion resistance of different stainless steel grades in simulated food contact. **Corrosion**, [s. l.], v. 72, p. 775–790, 2016. DOI <https://doi.org/10.5006/2057>. Disponível em: <https://meridian.allenpress.com/corrosion/article/72/6/775/199087/Metal-Release-and-Corrosion-Resistance-of>. Acesso em: 21 jan. 2024.

MOU, Liming et al. News Insights on Intergranular Corrosion Resistance Mechanism of Type 304 Austenitic Stainless Steel by Adjusting Carbon Contents. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 26, p. 666-680, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.220>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785423017490>. Acesso em: 14 jan. 2024.

NSF INTERNATIONAL. **Norma NSF/ANSI 51-1997**: Food Equipment Materials. 1997.

OSHIMA, Takayuki; HABARA, Yasuhiro; KURODA, Kotaro. Efforts to Save Nickel in Austenitic Stainless Steels. **ISIJ International**, [s. l.], v. 47, ed. 3, p. 359–364, 11 jan. 2007. DOI <https://doi.org/10.2355/isijinternational.47.359>. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/47/3/47_3_359/_article. Acesso em: 21 jan. 2024.

OUTOKUMPU. **Stainless steels for corrosive environments**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.outokumpu.com/en/products/product-ranges/core>. Acesso em: 27 fev. 2024.

PELLEGRINI, L. de V.; ZIMMER, C. G. É seguro utilizar aços inoxidáveis austeníticos Cr-Mn na indústria alimentícia? Uma revisão sistemática. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, [S. l.], v. 22, n. 1, p. 1801–1827, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n1-095. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/2821>. Acesso em: 28 jan. 2024.

PG PACK. **O combate à corrosão**. [S. l.], 26 ago. 2022. Disponível em: <https://www.pgpack.com.br/o-combate-a-corrosao/>. Acesso em: 17 fev. 2024.

PISTORIUS, P.C.; TOIT, M. du. **Low-nickel austenitic stainless steels: metallurgical constraints**. The Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future, Finlândia, 6 jun. 2010. Disponível em: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXII/911-Pistorius.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2024.

SABARÁ, E.W.F. **Caracterização Microestrutural e Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Austeníticos utilizados em aplicações como Biomateriais**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São João del-Rei, São José del rei, 2013.

SKOOG, Douglas A.; HOLLER, F. James; CROUCH, Stanley R. *Princípios de análise instrumental*. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. *Foundations of Materials Science and Engineering*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2013.

SOUZA FILHO, I.R.; Sandim, M.J.R.; Cohen, R.; Nagamine, L.C.C.M.; Hoffman, J.; Bolmaro, R.E.; Sandim, H.R.Z. "Effects of strain-induced martensite and its reversion on the magnetic properties of AISI 201 austenitic stainless steel", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, vol. 419, p. 156-165, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.06.027>

SOUZA, Marcel Freitas. **Estudo do comportamento das tensões residuais em amostras jateadas de aços inoxidáveis aisi 201In e aisi 304I**. 2021. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia Universidade Federal Fluminense, [S. l.], 2021.

STRAUSS, C.; Gustus, R.; Maus-Friedrichs, W.; Schöler, S.; Holländer, U.; Möhwald, K. "Influence of atmosphere during vacuum heat treatment of stainless steels AISI 304

and 446”, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 264, pp. 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.038>

TRANCHIDA, G.; Clesi, M.; Di Franco, F.; Di Quarto, F.; Santamaria, M. “Electronic properties and corrosion resistance of passive films on austenitic and duplex stainless steels”, **Electrochimica Acta**, vol. 273, pp. 412-423, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.04.058>

TANG, Peng; LIU, Qian-nan; YANG, Xue-xuan. Comparative Study on Microstructure and Properties of the Cr–Mn–Ni Stainless Steel and the Cr–Ni Stainless Steel. **Physics of Metals and Metallography**, [s. l.], v. 123, ed. 14, p. 1557–1565., 19 out. 2022. DOI <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0203>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/HxWRPvT4Sfyy83sKzTtr9ph/?lang=en>. Acesso em: 21 jan. 2024.

WELZ, Bernhard; SPERLING, Michael. *Atomic absorption spectrometry*. 3. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

WOLYNEC, STEPHAN. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. 49. ed. [S. l.]: Edusp, 2003. v. 49. ISBN 8531407494.

WORLD STAINLESS. *Stainless Steel in Figures 2023*. Bruxelas: World Stainless Association, 2023. Disponível em: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Figures_2023_EN.pdf. Acesso em: 1 maio 2025.

WULPI, D. J. **Understanding How Components Fail**. 2. ed. Ohio/EUA: ASM International, 1999. 293 p.

YANG, Daoyuan; ZHU, Xiaoyan; GAO, Jie; SONG, Yan; SUI, Haixia; ZHU, Lei. Comparison of the test conditions of China and the Council of Europe on the release

levels of metals from stainless-steel products from the Chinese market. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 33, p. 100888, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214289422000801>. Acesso em: 27 mar. 2025.

ZHENG, Chengsi; LIU, Chunjiao; REN, Minghao; JIANG, Heng; LI, Longfei. Microstructure and mechanical behavior of an AISI 304 austenitic stainless steel prepared by cold- or cryogenic-rolling and annealing. **Materials Science & Engineering A**, [s. l.], v. 724, p. 260-268, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.105>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509318304726?via%3Di> hub. Acesso em: 11 fev. 2024.