

AÇOS INOXIDÁVEIS: ANÁLISE COMPARATIVA DA CORROSÃO ENTRE LIGAS DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO (201 X 202 X 304)

Victor Cascaes Cardoso – victorccardoso1@gmail.com

Antonio Augusto Couto (Orientador) – acouto@mackenzie.br

RESUMO

Os aços inoxidáveis são conhecidos pela sua alta resistência à corrosão, porém cada aço deve ser especificado corretamente para que possa exercer seu papel na aplicação desejada e elevar a vida útil do produto. Com isso, foi realizado um estudo objetivando comparar o desempenho de diferentes aços inoxidáveis em meios representativos de aplicações como cozinhas industriais, utensílios domésticos, mesas de fogões e revestimentos em geral, juntamente com uma revisão bibliográfica sobre o tipo de corrosão as quais aplicações estão sujeitas e o efeito dos elementos de liga nessa corrosão. O objetivo final é a seleção adequada do tipo de aço inoxidável para as referidas aplicações. Foram realizados ensaios de imersão em três produtos de limpeza (hipoclorito de sódio 3,5 %, Divosan Forte 0,5 % e Limpa Forno); em quatro produtos alimentícios (vinagre + 3,5 NaCl, sumo de limão + 3,5 % NaCl, molho de tomate e refrigerante) e suor sintético; ensaios acelerados de corrosão em câmara úmida e em câmara de névoa salina; com os seguintes aços: 201 importados da China: 201(1) 2B; 201(1) NR4; 201(2) BA e 201(2) NR4; 201(3) 2B e 201(3) NR4; 202 da Aperam: 202 2D; 304 da Aperam: 304 2B e 304 NR4; Os ensaios foram realizados com o objetivo de verificar a resistência à corrosão relativa entre o aço 304 e os demais aços e reproduzir o processo de corrosão que os aços sofrem em um ambiente de cozinha através de ensaios de imersão (em vinagre + 3,5% NaCl, em Divosan Forte, em limpa forno, em molho de tomate, em suor sintético, em refrigerante, em sumo de limão + 3,5% NaCl) dos aços inoxidáveis no dia-a-dia em diversos parâmetros, como, ambientes ácidos e básicos e analisar o comportamento que cada aço inoxidável.

Palavras-chave: aço-inoxidável; cozinha industrial, hipoclorito de sódio, Divosan, limpa forno, vinagre, sumo de limão, molho de tomate, refrigerante, câmara úmida, câmara de névoa salina.

STAINLESS STEELS: COMPARATIVE ANALYSIS OF CORROSION BETWEEN GRADES OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL (201 X 202 X 304)

ABSTRACT

Stainless steels are known for their high resistance to corrosion, but each steel must be specified correctly so that it can play its role in the desired application and increase the product's useful life. With this in mind, a study was carried out to compare the performance of different stainless steels in media representative of applications such as industrial kitchens, domestic utensils, stove tops and coatings in general, together with a literature review on the type of corrosion to which applications are subject and the effect of alloying elements on this corrosion. The ultimate aim is to select the right type of stainless steel for these applications. Immersion tests were carried out in three cleaning products (sodium hypochlorite 3.5 %, Divosan Forte 0.5 % and Oven Cleaner); in four food products (vinegar + 3.5 NaCl, lemon juice + 3.5 % NaCl, tomato sauce and soda) and synthetic sweat; accelerated corrosion tests in a humid chamber and in a salt spray chamber; with the following steels: 201 imported from China: 201(1) 2B; 201(1) NR4; 201(2) BA and 201(2) NR4; 201(3) 2B and 201(3) NR4; 202 from Aperam: 202 2D; 304 from Aperam: 304 2B and 304 NR4; The tests were carried out with the aim of verifying the relative corrosion resistance between 304 steel and the other steels and reproducing the corrosion process that the steels undergo in a kitchen environment through immersion tests (in vinegar + 3.5% NaCl, in Divosan Forte, in oven cleaner, in tomato sauce, in synthetic sweat, in soda, in lemon juice + 3.5% NaCl) of the stainless steels in everyday life in various parameters, such as acidic and basic environments and analyzing the behavior of each stainless steel.

1 INTRODUÇÃO

Existem vários tipos de aço inoxidável, todos com resistência à corrosão em diferentes graus. O tipo mais comum e importante dentro da família do aço inoxidável é conhecido como austenítico, que é caracterizado por alta resistência à corrosão. O aço inoxidável austenítico é frequentemente usado como material de construção em vários ambientes agressivos, como sistemas de tubulação, equipamentos trocadores de calor, plataformas de perfuração, fábricas de produtos químicos, usinas de dessalinização e estações de tratamento de águas residuais. A alta resistência à corrosão do aço inoxidável é atribuível à presença de filme passivo. Este filme é estável, invisível, fino, durável e extremamente aderente e auto-reparável. A estabilidade dos filmes passivos e as reações que ocorrem na região do potencial transpassivo dependem da natureza do potencial anódico e do ânion presente (Química e Física de Materiais, volume 15, edição 1, pg 80-85).

As famílias dos austeníticos são o maior grupo de aços inoxidáveis e podem ser divididos em cinco subgrupos: tipos Cr-Mn, tipos Cr-Ni, tipos Cr-Ni-Mo, "grades" austeníticos de alto desempenho e tipos austeníticos de alta temperatura. Os aços austeníticos têm uma resistência à corrosão boa a excelente, boa formabilidade e soldabilidade. A sua boa resistência ao impacto a baixas temperaturas é frequentemente explorada em aplicações criogênicas. Os tipos austeníticos não são magnéticos no estado recozido em solução devido à microestrutura austenítica.

Classes Cr-Ni (304)

As qualidades Cr-Ni são "qualidades para fins gerais" principalmente ligadas com cromo e níquel, mas sem molibdênio. Estas qualidades são por vezes referidas como aços inoxidáveis do tipo 18-8, indicando o teor aproximado de cromo e de níquel, respectivamente.

Algumas qualidades são ligadas com azoto para melhorar a resistência, ou com enxofre para melhorar a maquinabilidade. Existem também qualidades estabilizadas às quais é adicionado titânio ou nióbio para aumentar as propriedades mecânicas a altas temperaturas através da formação de carbonetos endurecedores. Anteriormente, a estabilização do titânio e do nióbio era também utilizada para evitar precipitados de carbonetos prejudiciais na soldadura, mas para os modernos aços Cr-Ni de baixo teor de carbono isto não é necessário.

Classes Cr-Mn (201)

Nos aços Cr-Mn, também designados por aços da "série 200", de acordo com a nomenclatura AISI/ASTM, o teor de níquel é reduzido e a microestrutura austenítica é mantida através da substituição de parte do níquel por manganês e azoto. A composição química do grau 4372 é de cerca de 17 % Cr, 4 % Ni e 7 % Mn. Este tipo tem quase a mesma formabilidade, resistência à corrosão e soldabilidade que o tipo 4301, mas com maior resistência. (Handbook of Stainless Steel, Outokumpu, 2009).

2 REVISÃO DA LITERATURA

De acordo com Modenesi (2001), os aços inoxidáveis estão separados por famílias como os aços austeníticos, ferríticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação, no qual a composição química do aço irá indicar a qual grupo um determinado aço inoxidável irá pertencer.

A seleção de um aço inoxidável depende do tipo da aplicação, sendo considerados como requisitos o quão o ambiente é corrosivo, o tempo de vida útil e a resistência à corrosão. Muitas vezes, a resistência à corrosão é considerada como fator primário (KELLY, 2001).

Os aços inoxidáveis são particularmente resistentes ao meio de exposição mais frequente que é a atmosfera natural. Nesse meio, os aços inoxidáveis inclusive preservam o brilho especular intrínseco. Além do Cr, que define a classe desses aços, a adição de outros elementos de liga exerce um papel importantíssimo, devendo ser considerada durante a escolha do melhor tipo de aço inoxidável para uma determinada aplicação.

Assim sendo, é de fundamental importância um amplo conhecimento da resistência à corrosão dos aços inoxidáveis, incluindo o conhecimento do efeito dos elementos de liga. Esse relatório tem por objetivo apresentar uma ampla revisão sobre o efeito de Cr e dos elementos de adição Ni e Mn, na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos. A revisão é focada nos aços inoxidáveis austeníticos 201 e 304.

2.1 Efeito do Cr

O Cr é o principal elemento de liga dos aços inoxidáveis, sendo inclusive o elemento que classifica as ligas ferrosas em aços inoxidáveis: são considerados aços inoxidáveis, as ligas que contêm predominantemente Fe e uma porcentagem de Cr não inferior a 10 %.

Outros autores apontam a faixa entre 11 % a 12 % como o limite requerido (MCGUIRE, 2008, p.29), afirmando que esse limite é o mínimo necessário para que os átomos de Cr presentes na superfície se liguem aos átomos de O adsorvidos e formem a camada passiva. Já Asami, Hashimoto e Shimodaira (1978), com base em estudos realizados com aços inoxidáveis ferríticos, afirmam que um teor mínimo de 12,5 % é necessário para se verificar redução significativa da taxa de corrosão dos aços inoxidáveis ferríticos. Em qualquer caso, o mecanismo pelo qual a fina camada passiva, de vários nanômetros de espessura, se forma é assunto de pesquisa contínua, mas sabe-se que ela é enriquecida em Cr, sendo mais fina e mais eficiente quanto maior o teor de Cr na liga. O Cr é o principal responsável também para a estabilidade da camada passiva (MCGUIRE, 2008, p.44).

2.1.1 Efeito do Ni

O Ni metálico é conhecido por ser altamente reativo com o ambiente externo, formando de forma espontânea camadas passivas compostas principalmente por NiO e Ni(OH)₂. No entanto, as camadas passivas formadas sobre o Ni puro não são tão finas como as formadas sobre o Cr, chegando a tornar uma superfície brilhante de Ni mais fosco, mas tem alta capacidade de proteger o metal contra a corrosão. O Ni, assim como o Cr, raramente é usado sozinho, porém tem extenso uso na composição dos aços inoxidáveis. Depois do Cr, o principal elemento de liga dos aços inoxidáveis austeníticos é o Ni.

O Ni, quando adicionado aos aços inoxidáveis, tem o efeito de diminuir a taxa de corrosão generalizada (estado ativo) e a densidade de corrente crítica, mas não contribui para a estabilidade da camada passiva. Estudos mostraram que uma camada enriquecida de Ni é formada sob a camada passiva (FREIRE et al., 2012). Acredita-se que haja uma ligação forte entre Ni e Cr, reduzindo a taxa de dissolução anódica da liga e permitindo o enriquecimento anódico desses elementos na superfície como consequência da corrosão seletiva do Fe. O Ni não ajuda ativamente na formação da camada passiva e pode até prejudicar a estabilidade da camada em ambientes altamente ácido/oxidantes (MCGUIRE, 2008, p.30). Além disso, O Ni confere um acabamento polido e brilhante ao aço inoxidável. Isso é especialmente importante para os aços inoxidáveis de grau cirúrgico, pois favorece a manutenção da higiene de instrumentos cirúrgicos (MONTERO et al., 2020).

2.1.2 Efeito de Mn

O Mn apresenta grande propensão em formar o sulfeto de Mn (MnS) e por esta razão é usado para sequestrar o S. O MnS precipita como inclusão, sendo a intensidade da precipitação função direta da concentração de Mn e de S no aço, podendo formar tanto no estado líquido como no estado sólido, sendo esta formação dependente tanto da concentração de Mn como de S. Os aços inoxidáveis normalmente contêm 1,5 % de Mn, adicionados com a função de desoxidação/dessulfurização e para substituir parte do Ni.

Se o teor de Mn for muito baixo, a temperatura de supersaturação diminui, o que dificulta a precipitação de MnS. Assim sendo, em aços de muito baixo teor de Mn, a formação de inclusões pode ser evitada mesmo com teores relativamente altos de S, o que evita a iniciação de pites. O baixo teor de Mn pode também reduzir a coprecipitação de sulfetos de Cr, evitando o empobrecimento do Cr ao redor das inclusões o que também contribui para o aumento da resistência à corrosão.

No entanto, quando o teor de Mn é elevado, como os dos aços inoxidáveis da série 200, o teor de S deve ser rigorosamente controlado para evitar a precipitação do MnS. Khobragade, Khan e

Patil (2014) recomendam que, se a opção for a substituição dos aços inoxidáveis da série 300 por aços com baixos teores de Ni ou por aços Cr-Mn, se escolham fornecedores de alta reputação e muito bem informados sobre as características de cada aço. Aços proprietários sem respaldo de especificações técnicas aparecem no mercado decorrente das pressões de redução de custos. Tais aços, muitas vezes, não foram estudados com detalhes no que se refere à resistência à corrosão e, por esta razão, podem incorrer em prejuízos pois podem apresentar falhas prematuras (KHOBRADE; KHAN; PATIL, 2014).

2.2 Corrosão

Corrosão é a degradação da superfície de um material, normalmente um metal, por ação química ou eletroquímica do ambiente ao qual está exposto. A degradação representa características no material que em sua maioria são danosas e indesejáveis, tornando-o impróprio para sua aplicação (GENTIL, 2011).

Segundo Jambo e Fófano (2009) as formas de corrosão são classificadas de acordo com seu aspecto ou forma de ataque. Sendo assim, a corrosão pode ocorrer segundo: a morfologia, as causas ou mecanismos, os fatores mecânicos, o meio corrosivo e a localização do ataque. Na localização do ataque encontram-se a corrosão por pite, intergranular, uniforme, transgranular, entre outros (GENTIL, 2011).

3 METODOLOGIA

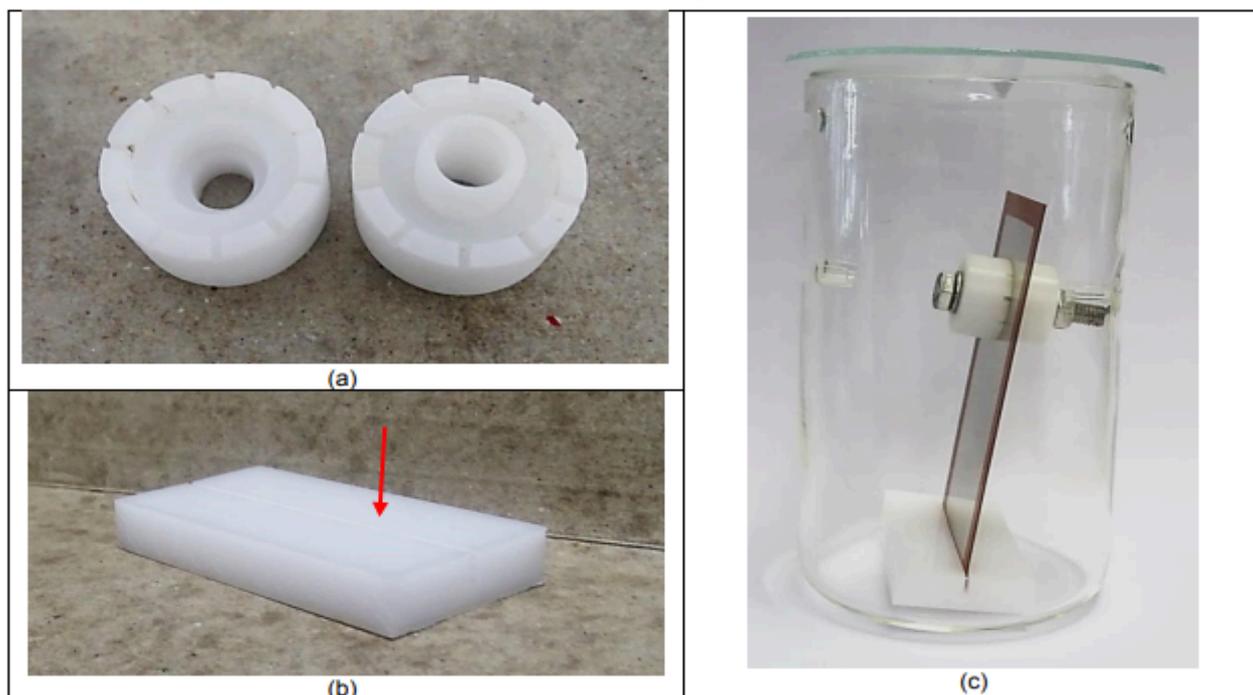
3.1 Análise química

A análise química foi realizada em dois processos, o primeiro via úmida e depois foi feita uma análise via espectrofotometria de absorção atômica. No processo via úmida, as amostras foram colocadas em um béquer e diluídas em ácido (HCl), quando a amostra estava totalmente dissolvida foi feita uma filtração para retirar os resíduos não dissolvidos e as amostras foram limpas com água desionizada. Na segunda etapa, foi feita a espectrofotometria de absorção atômica, a solução foi introduzida ao equipamento por um nebulizador, que transformou a amostra em aerossol fino. Após isso a amostra foi atomizada para que os elementos sejam quantificados através da absorção da luz em comprimentos de onda específicos. Ambos os processos foram feitos com base nas normas ASTM E1806 "Prática padrão para amostragem de aço e ferro para determinação da composição química" e ASTM E1086 "Método de teste padrão para análise de aço inoxidável austenítico por espectrometria de emissão atômica de faísca".

3.2 Ensaio de imersão

Os ensaios de imersão serão realizados com chapas fornecidas pelo Cliente de dimensões 5 cm x 10 cm, já providas com um furo de 5,5 mm de raio, para a instalação dos dispositivos formadores de frestas. Os dispositivos formadores de frestas foram confeccionados com Teflon tendo como base a norma ASTM G 78 (ASTM, 2001) (Figura 1a). As chapas serão submetidas ao seguinte procedimento de limpeza: retirada da película protetora; limpeza rápida (10 s) com algodão embebido com HCl a 10 % (fração de volume); lavagem com água Mili-Q; lavagem com detergente Extran neutro 10 % (fração de volume); lavagem com água Mili-Q; rinsagem com etanol, seguida de rinsagem com acetona; secagem com ar quente. Após a limpeza, as bordas das chapas serão protegidas da seguinte maneira: delimitou-se em cada chapa a região na qual seria feita a proteção de borda; aplicou-se, por imersão, a tinta W-POXI GNP 415 nas quatro bordas de cada chapa; armazenaram-se as chapas em laboratório por 7 dias para a secagem da tinta. Nas chapas já com as bordas protegidas, os dispositivos formadores de fresta foram instalados. O aperto final será feito com um torquímetro calibrado aplicando um torque de 3,0 N.m. Os corpos de prova já com os dispositivos formadores de fresta foram instalados em suportes de Teflon providos de uma fenda de 1 mm (Figura 1). Esse conjunto será colocado dentro de béqueres de 450 mL, previamente limpos com detergente Extran neutro 10 % e rinsados com água Mili-Q, álcool e acetona (Figura 1c). Finalmente, as soluções de ensaio serão transferidas para os recipientes de ensaio (béqueres).

Figura 1 -Imagens do dispositivo formador de fresta (a), do suporte para fixação dos corpos de prova (b) e do recipiente de ensaio já com o corpo de prova instalado (c)



Fonte: Autores

3.3 Ensaio acelerados de corrosão

O ensaio em câmara úmida e o ensaio em câmara de névoa salina serão realizados segundo a norma e ABNT NBR 8095 (2015) e a norma ABNT NBR 8094 (1984), respectivamente. Serão utilizados a câmara úmida de Marca Q-LAB - Modelo Q-FOG/SSP600 e a câmara de névoa salina marca Equilam - Modelo KEQUM 300e. As bordas das chapas de cada aço, fornecidas pelo Cliente na dimensão 10 cm x 15 cm, serão protegidas da seguinte maneira:

- delimitou-se em cada chapa a região na qual seria feita a proteção de borda;
- aplicou-se, por imersão, a tinta W-POXI GNP 415 nas quatro bordas de cada chapa;
- armazenaram-se as chapas em laboratório por 7 dias, para a secagem da tinta.

Os corpos de prova com as bordas protegidas serão instalados nas câmaras de ensaio. No caso do ensaio de névoa salina, serão feitos registros fotográficos periodicamente.

4 RESULTADOS

4.1 Composição química

A Tabela 1 apresenta a composição química das amostras de aço inoxidáveis austeníticos em estudo e a composição nominal (célula azul escura e letra branca) de cada grupo de aços. É importante mencionar que os aços 201 foram adquiridos no mercado como sendo aços importados da China. Pode-se verificar que: aços 201: todas as amostras desta série apresentam teores fora dos limites estabelecidos para um aço S20100 para os elementos Mn, Cr e Ni (letras vermelhas); aço 202 2D: apresentou teor de Cr abaixo do especificado para um aço S20200 (letra vermelha). Chama-se a atenção que este foi o aço com o menor teor de S, dentre todos da série austenítica ensaiados (letra verde); aço 304 2B: apresentou apenas o teor de Ni ligeiramente abaixo do valor especificado para um aço S30400 (letra vermelha);

Tabela 1 - Composição química das amostras de aços inoxidáveis austeníticos estudadas – análise fornecida pela APERAM. Fração de massa (%)

UNS/outro	Acab	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Cu	Mo	Nb	Ti	Sn	V	Co	W
S20100*	-	0,15	5,5-7,5	0,060	0,030	1,00	16,0-18,0	3,5-5,5	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-
201(1)	2B	0,15	9,4	0,044	0,002	0,46	12,9	1,2	0,16	0,257	0,006	0,003	0,007	0,006	0,11	0,130	0,011
	NR4	0,15	10,1	0,042	0,003	0,43	13,2	1,2	0,15	0,305	0,006	0,003	0,006	0,006	0,07	0,092	0,011
201(2)	BA	0,14	8,7	0,038	0,002	0,41	14,6	1,1	0,16	0,207	0,007	0,003	0,005	0,006	0,12	0,104	-
	NR4	0,14	8,7	0,037	0,002	0,41	14,6	1,1	0,16	0,207	0,007	0,003	0,005	0,005	0,12	0,105	-
201(3)	2B	0,08	10,4	0,041	0,001	0,41	13,4	1,3	0,16	0,802	0,005	0,003	0,006	0,005	0,11	0,117	0,011
	NR4	0,09	10,4	0,041	0,001	0,41	13,4	1,3	0,16	0,801	0,005	0,003	0,005	0,005	0,11	0,117	0,011
S20200*	-	0,15	7,5-10	0,060	0,030	1,00	17-19	4-6	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-
202	2D	0,06	7,3	0,026	0,0002	0,50	15,1	4,10	0,045	1,656	0,042	0,003	0,004	0,006	0,042	0,025	0,015
S30400*	-	0,08	2,00	0,045	0,030	0,75	18-20	8-10,5	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-
304	2B	0,05	1,22	0,037	0,003	0,44	18,3	8,0	0,05	0,23	0,128	0,008	0,003	0,005	0,056	0,187	0,023
	NR4	0,05	1,24	0,035	0,002	0,47	18,12	8,0	0,07	0,23	0,117	0,008	0,003	*	0,052	0,177	0,022

Fonte: Autores

a Valores máximos, exceto para Mn, Cr e Ni

b Valores máximos, exceto para Cr e Ni

4.2 Ensaio de imersão em hipoclorito de sódio a 2,5 %

A Figura 3 apresenta o aspecto geral dos recipientes dos ensaios de imersão em hipoclorito de sódio a 2,5 %, imediatamente após a montagem. Pode-se verificar que o hipoclorito de sódio era transparente e apresentava uma coloração levemente amarelada. No entanto, a inspeção cuidadosa dos recipientes de ensaio mostrou a presença de partículas sólidas de coloração escura, quase preta, depositadas no fundo dos recipientes e, também aderidas à superfície dos corpos de prova.

Figura 3 – Aspecto do ensaio de imersão em solução de hipoclorito de sódio a 2,5 %. Verifica-se que a solução de hipoclorito é transparente e levemente amarelada



Fonte: Autores

Passadas algumas horas de ensaio, já se observavam mudanças na coloração do hipoclorito e alterações da superfície dos corpos de prova. A Figura 4 mostra o aspecto dos corpos de prova de acabamento brilhante e lixados, após 1 dia de imersão na solução de ensaio. Pode-se verificar que somente o aço 304 com os dois acabamentos (brilhante e lixado) não apresentou regiões com corrosão vermelha e nem escurecimento acentuado. Os demais aços apresentaram sinais de corrosão em frestas e/ou escurecimento da superfície.

Figura 4 – Aspecto dos corpos de prova dos diferentes aços dentro da solução de hipoclorito de sódio a 2,5 % após 1 dia de ensaio



Fonte: Autores

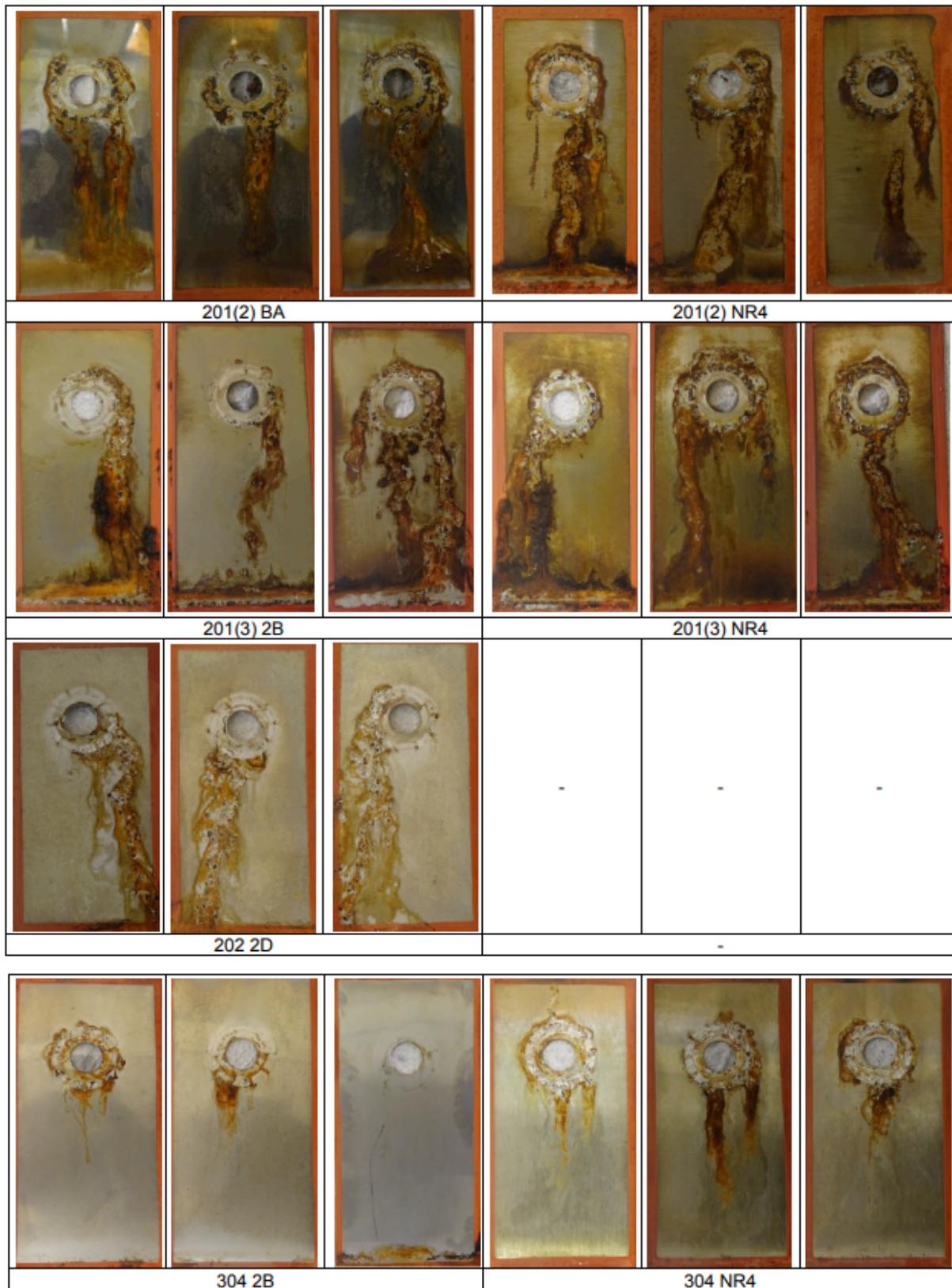
A Figura 5 apresenta os resultados após 14 dias de ensaio em hipoclorito de sódio a 2,5 %, após a limpeza dos corpos de prova.

Figura 5 – Aspecto dos corpos de prova após 14 dias de imersão em solução de hipoclorito de sódio 2,5 %. Os corpos de prova foram lavados com água corrente sob leve esfregamento, rinsados com água Mili-Q, álcool e acetona e depois secados com ar quente



Fonte: Autores

Figura 5 – Aspecto dos corpos de prova após 14 dias de imersão em solução de hipoclorito de sódio 2,5 %. Os corpos de prova foram lavados com água corrente sob leve esfregamento, rinsados com água Mili-Q, álcool e acetona e depois secados com ar quente



Fonte: Autores

Antes de discutir a Figura 5, convém mencionar que o pH de todas as soluções foi medida e foi calculada o valor médio, obtendo-se 8,72 (com desvio padrão de 0,29) como já apresentado na Tabela 6. Lembrando que o pH inicial da solução de hipoclorito era de 12,32, conclui-se que houve uma significativa acidificação do meio. Muito provavelmente, a formação de uma grande quantidade de produtos de corrosão sólidos (hidróxidos de Fe^{3+}) formados pela reação de hidrólise dos íons de ferro deve ter causado o abaixamento de pH.

Pela Figura 5 pode-se verificar que todos os aços apresentaram corrosão em frestas, confirmando a elevada susceptibilidade dos aços estudados a este tipo de corrosão.

Na tentativa de verificar a susceptibilidade relativa entre os aços estudados, foi elaborada a Tabela 3 que apresenta a média do número total de frestas corroídas para cada tipo de aço/acabamento. Pode-se verificar que todos os aços com acabamento NR4 (lixado) apresentaram valores médios maiores do que 9 frestas corroídas por corpo de prova, não se podendo fazer uma classificação relativa dos aços com acabamento lixado estudados quanto à susceptibilidade à corrosão por frestas em hipoclorito de sódio.

Tabela 3 – Número total de frestas por corpo de prova após 14 dias de imersão em solução de hipoclorito de sódio a 2,5 %

Aço/acabamento brilhante	Número de frestas		Aço/acabamento NR4	Número de frestas	
	Total	Média		Total	Média
201(1) 2B	10	10	201(1) NR4	10	10,0
	10			10	
	10			10	
201(2) BA	9	9,7	201(2) NR4	10	9,3
	10			8	
	10			10	
201(3) 2B	6	8,6	201(3) NR4	10	10
	10			10	
	10			10	
202 2D	5	5,0	-	-	-
	4			-	
	6			-	
304 2B	10	4,3	304 NR4	10	10
	3			10	
	0			10	

Fonte: Autores

Entre os aços com acabamento brilhante, somente os aços 202 2D e 304 2B apresentaram um valor igual ou inferior a 5 frestas corroídas por corpo de prova. Os demais apresentaram valores superiores a 9 frestas por corpo de prova, com exceção do 201(3) NR4 que apresentou um valor de 8,6. Esses resultados mostram que os aços estudados são altamente susceptíveis à corrosão em frestas em solução de hipoclorito de sódio à 2,5 % e que ao se confeccionar bancadas de cozinha industrial com aço inoxidável, frestas devem ser evitadas. Caso isto não seja possível, as frestas devem ser seladas (INCO, 1963). Apesar de não estar visível na Figura 5, praticamente todos os aços estudados apresentaram pites na superfície, especialmente nas regiões com escoamento de

produtos de corrosão. Na tentativa de verificar a susceptibilidade relativa à corrosão por pite entre os aços estudados, foi elaborada a Tabela 4 que apresenta para cada aço estudado o número total de pites por corpo de prova. Essa contagem foi feita com o auxílio de uma lupa de Marca Solver, Modelo SLP-195 LED/UV com aumento 2,5x.

Tabela 4 – Número total pites por corpo de prova após 14 dias de imersão em solução de hipoclorito de sódio 2,5 %. Contagem feita com o auxílio de uma lupa (aumento 2,5x)

Aço/acabamento brilhante	Número total de pites		Aço/acabamento NR4	Número total de pites	
	Total	Média		Total	Média
201(1) 2B	78	54	201(1) NR4	130	113
	8			85	
	75			123	
201(2) BA	22	33	201(2) NR4	71	59
	50			48	
	28			58	
201(3) 2B	52	78	201(3) NR4	61	61
	54			70	
	128			53	
202 2D	83	81	-	-	-
	87			-	
	74			-	
304 2B	0	0	304 NR4	3	3
	0			5	
	0			0	

Fonte: Autores

Pode-se verificar pela Tabela 5 que os aços da série 200 apresentam os maiores valores e o aço 304 o menor valor médio do número total de pites por corpo de prova. Para melhor visualização foi elaborado a Tabela 25 que apresenta uma classificação da susceptibilidade à corrosão por pite dos aços inoxidáveis usando como critério o número médio de pites por corpo de prova após imersão em solução de hipoclorito de sódio por 14 dias. Pode-se verificar que o aço 304 é o mais resistente à corrosão por pites em solução de hipoclorito de sódio a 2,5 % dentre os aços estudados.

Tabela 5 – Classificação dos aços estudados quanto à resistência à corrosão por pite usando como critério o número médio de pites por corpo de prova após imersão por 14 dias em solução de hipoclorito de sódio a 2,5 %

Susceptibilidade à corrosão por pite	Aço/acabamento	Número médio de pites por corpo de prova
<p style="text-align: center;">Menos susceptível</p>  <p style="text-align: center;">Mais susceptível</p>	304 2B	0
	304 NR4	3
	201(2) BA	33
	201(1) 2B	54
	201(2) NR4	59
	201(3) NR4	61
	201(3) 2B	78
	202 2D	81
	201(1) NR4	113

Fonte: Autores

5 DISCUSSÃO

O hipoclorito de sódio 2,5 % foi o meio de ensaio mais agressivo dentre todos os ensaiados. Esse meio foi capaz de causar severa corrosão em frestas em todos os aços estudados e, também, corrosão por pite. O parâmetro que diferenciou o desempenho dos aços nesse meio foi o número de pites por corpo de prova. Segundo esse critério, os aços foram classificados na seguinte ordem:

Tabela 6 – Hipoclorito de sódio 2,5 % - pH inicial: 12,32 e pH final: 8,72

304 2B	304 NR4	201(2) BA	201(1) 2B	201(2) NR4	201(3) NR4	201(3) 2B	202 2D	201(1) NR4
<p>Corrosão por pite</p> <p>Melhor desempenho → Pior desempenho</p>								

Fonte: Autores

Pode-se verificar claramente que o aço 304 foi o de melhor desempenho e os da série 200 foram os de pior desempenho. Não há uma tendência clara do aço de acabamento brilhante apresentar um desempenho melhor, como era esperado. Três aços apresentaram desempenho melhor com o acabamento brilhante (304, 201(2) e 201(1)) e apenas um com o acabamento NR4 (201 (3)). Todos os aços apresentaram corrosão em frestas severa. Nesse caso, somente o aço 304 2B apresentou susceptibilidade superior significativa à corrosão em frestas em relação aos seus correspondentes acabamentos NR4.

No produto de limpeza Divosan Forte 0,5 %, ocorreu somente corrosão em frestas em todos os aços estudados e, neste caso, só foi possível classificar os aços usando como critério o número de frestas por corpo de prova. Segundo esse critério, os aços foram classificados na seguinte ordem:

Tabela 7 – Divosan Forte 0,5 % - pH inicial: 3,36 e pH final: 3,95

304 2B	202 2D	201(2) BA	201(1) 2B	201(2) NR4	304 NR4	201(1) NR4	201(3) NR4	201(3) 2B
<p>Corrosão em fresta</p> <p>Melhor desempenho → Pior desempenho</p>								

Fonte: Autores

Pode-se verificar que o aço 304 2B foi o de melhor desempenho, porém o aço 304 NR4 apresentou desempenho intermediário. Além disso, o exame visual mostrou que a profundidade das frestas dos aços do grupo 201 era maior do que a do aço 202 2D e do 304. Isso confirma o efeito benéfico do Ni em aumentar a resistência à corrosão em frestas por aumentar a resistência à

corrosão generalizada da liga dentro da fresta. Nesse caso, verificou-se uma ligeira tendência de desempenho melhor para o acabamento brilhante: três aços apresentaram desempenho melhor com o acabamento brilhante (304, 201(2) e 201(1)) e apenas um foi melhor com o acabamento NR4 (201(3)).

O vinagre + 3,5 % NaCl e o sumo de limão + 3,5 % NaCl foram os únicos produtos em que alguns aços apresentaram corrosão generalizada. Os ácidos orgânicos, como o ácido acético e o ácido cítrico, geralmente não são agressivos aos aços inoxidáveis, havendo poucos casos de falhas em serviço. Por essa razão, os aços inoxidáveis são largamente utilizados na indústria alimentícia, no setor de petróleo, indústrias de sabão, farmacêuticas e químicas onde os ácidos orgânicos são comuns. As indústrias de produção de ácido acético usam equipamentos confeccionados com aço inoxidável com sucesso (INCO, 1963). Especialmente em temperaturas mais baixas, o aço 304 apresenta um desempenho satisfatório (MCGUIRE, 2008, p.102). No entanto, a presença de íons cloreto pode tornar o meio mais agressivo (MCGUIRE, 2008, p.35), fato que foi claramente verificado no presente estudo. Quando cloretos são adicionados a esses ácidos, aços inoxidáveis mais resistentes do que os do presente estudo são utilizados, como o 316 (INCO, 1963). Assim sendo, era esperada a ocorrência de corrosão nessas soluções.

A agressividade do vinagre + 3,5 % NaCl foi maior. Nesse meio, alguns corpos de prova de cada grupo do aço 201 sofreram corrosão generalizada, enquanto no sumo de limão + 3,5 % NaCl, não houve corpos de prova que apresentaram corrosão generalizada. Os aços do grupo 201 que apresentaram corrosão generalizada em vinagre + 3,5 % NaCl foram:

- 201(1): dois corpos de prova com acabamento brilhante e um com acabamento NR4;
- 201(2): dois corpos de prova com acabamento brilhante;
- 201(3): dois corpos de prova com acabamento NR4.

Uma investigação da razão da significativa falta de repetibilidade no vinagre + 3,5 % NaCl revelou um fato de extrema importância: há uma variabilidade muito grande na composição química das chapas comercializadas como sendo o mesmo aço, o que é um problema, pois é possível que a intensidade e o tipo de corrosão sejam diferentes em uma mesma estrutura ou equipamento expostos a um mesmo meio, conforme foi visto neste trabalho.

Diante da ocorrência de corrosão generalizada de alguns corpos de prova dos aços do grupo 201, conclui-se que o aço 304 e o aço 202 foram os de melhor desempenho.

Considerando apenas os aços do grupo 201 que não apresentaram corrosão generalizada, o aço 304 continuou sendo o de melhor desempenho, pois, apesar de apresentar número de frestas por corpo de prova comparável ao dos aços do grupo 201, a profundidade das frestas foi menor no aço 304. Isso confirma o efeito benéfico do Ni em aumentar a resistência à corrosão em frestas por

aumentar a resistência à corrosão generalizada da liga dentro da fresta. Diante do exposto, podemos classificar os aços ensaiados em vinagre + 3,5 % NaCl como segue:

Tabela 8 – Vinagre + 3,5 % NaCl - pH inicial: 2,87 e pH final: 3,35

Fresta		Fresta e generalizada
202 2D	304	201 (1); 201 (2); 201 (3)
<p>Corrosão em fresta e generalizada</p>		

Fonte: Autores

No sumo de limão + 3,5 % NaCl, os aços do grupo 201 e o aço 304 apresentaram um número de frestas por corpo de prova comparáveis. No entanto, em média a profundidade das frestas do aço 304 foi menor do que a dos aços do grupo 201. Se o ensaio tivesse sido conduzido por maior período, muito provavelmente, a superioridade do aço 304 ficaria mais evidente.

Diante do exposto, podemos classificar os aços ensaiados em sumo de limão + 3,5 % NaCl como segue:

Tabela 9 – Sumo de limão + 3,5 % NaCl - pH inicial: 1,85 e pH final: 1,84

Fresta		
202 2D	304	201 (1); 201 (2); 201 (3)
<p>Corrosão em fresta e generalizada</p>		

Fonte: Autores

Convém mencionar que não foi verificada uma tendência clara da superioridade da resistência à corrosão do acabamento brilhante em relação ao acabamento lixado nem no ensaio com vinagre + 3,5 % NaCl e nem no sumo de limão + 3,5 % NaCl.

Os dois outros produtos alimentícios, molho de tomate e refrigerante, mostraram-se pouco agressivos. No molho de tomate, apareceram manchas nos aços 201(2) BA, 201(3) NR4 e 202 2D que eram decorrentes do início de um processo de corrosão por pite. Os pites puderam ser visualizados apenas com uma lupa estereoscópica com aumento de 3x. Assim sendo, considerou-se que esses aços como sendo os de menor desempenho. Porém devido à intensidade muito baixa dessa corrosão, acredita-se que uma diferenciação melhor poderia ser obtida se os ensaios fossem mais longos. No refrigerante, todos os aços apresentaram um bom desempenho.

Nos ensaios em suor sintético, todos os aços apresentaram corrosão em fresta. O número de frestas por corpo de prova foi menor no aço 202 2D. O aço 304 e os aços do grupo 201 apresentaram número de frestas por corpo de prova comparável, de modo que foi necessário medir a

profundidade das frestas do pior corpo de prova de cada aço/acabamento para que pudesse ser feita uma classificação de desempenho. O resultado do desempenho relativo foi a seguinte:

Tabela 10 – Suor sintético - pH inicial: 4,71 e pH final: 4,62

202 2D	304	201 (1); 201 (2); 201 (3)
<p>Corrosão em fresta</p>		
<p>Melhor desempenho Pior desempenho</p>		

Fonte: Autores

O ensaio em câmara úmida por 1 dia (24h) realizada para detecção de possíveis resíduos de ferramentas não revelou nenhum ponto de corrosão, indicando que todas as superfícies ensaiadas estavam isentas de contaminação metálica. No ensaio de corrosão em câmara de névoa salina, alguns corpos de prova apresentaram marcas de escorrimento de produtos de corrosão a partir da fina faixa de tinta de proteção. Esses não foram considerados na avaliação, pois este tipo de corrosão ocorre em frestas existentes entre o aço e a camada de tinta. Os aços analisados apresentaram corrosão localizada (pontos e pequenas áreas de corrosão). A classificação dos aços estudados quanto à resistência à corrosão em névoa salina foi a seguinte:

Tabela 11 – Câmara de névoa salina

Localizada								
304 2B	304 NR4	202 2D	201(2) BA	201(1) 2B	201(3) NR4	201(3) 2B	201(1) NR4	201(2) NR4
<p>Corrosão localizada</p>								
<p>Melhor desempenho Pior desempenho</p>								

Fonte: Autores

Pode-se verificar que os aços de acabamento brilhante apresentaram um desempenho melhor do que os lixados. O aço 304 e o aço 202 2D, nesta ordem, foram os de melhor desempenho. Entre os de acabamento NR4, o aço 304 foi o de melhor desempenho. Todos os aços do grupo 201 apresentaram desempenho muito menor do que o 304.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram realizados ensaios de imersão em três produtos de limpeza (hipoclorito de sódio 3,5 %, Divosan Forte 0,5 % e Limpa Forno); em quatro produtos alimentícios (vinagre + 3,5 NaCl, sumo de limão + 3,5 % NaCl, molho de tomate e refrigerante) e suor sintético; ensaios acelerados de corrosão em câmara úmida e em câmara de névoa salina; e ensaios eletroquímicos com os

seguintes aços:

- 201 importados da China: 201(1) 2B; 201(1) NR4; 201(2) BA e 201(2) NR4; 201(3) 2B e 201(3) NR4;
- 202 da Aperam: 202 2D;
- 304 da Aperam: 304 2B e 304 NR4;

Os ensaios foram realizados com o objetivo de verificar a resistência à corrosão relativa entre o aço 304 e os demais aços.

Entre os produtos de limpeza utilizados, o hipoclorito de sódio 2,5 % foi o meio mais agressivo, determinando forte corrosão por pite e em frestas para todos os aços.

Nesse meio, foi verificada superioridade à corrosão por pite do aço 304 2B e 304 NR4 em relação aos demais aços. Nenhuma tendência de desempenho superior dos aços com acabamento brilhante em relação ao NR4 foi verificada. Na corrosão em fresta, foi possível distinguir apenas os aços 304 2B que apresentou susceptibilidade superior aos demais aços/acabamentos estudados.

No Divosan Forte 0,5 %, ocorreu somente corrosão em frestas, tendo sido verificado um desempenho superior do aço 304 2B em relação ao 304 NR4 e aos demais aços. Nesse caso, em média, os aços da série 200 apresentaram susceptibilidade à corrosão em frestas inferior ao 304. No Limpa Forno, nenhum aço apresentou corrosão, não tendo sido possível a distinção entre os mesmos.

No caso dos produtos alimentícios, o vinagre + 3,5% NaCl e o sumo de limão + 3,5 % NaCl causaram corrosão generalizada e em frestas, sendo o primeiro o mais agressivo. No vinagre + 3,5 % NaCl, constatou-se a superioridade dos aços 304 em relação aos do grupo 201 e aos da série 400 em relação à corrosão generalizada. O aço 202 apresentou desempenho semelhante ao aço 304. No vinagre + 3,5 % NaCl, os corpos de prova dos aços 201(1), 201(2) e 201(3) apresentaram comportamentos diferentes entre si. Uma investigação desse fato mostrou que há uma variabilidade muito grande da composição química entre esses corpos de prova e que a tendência de ocorrência de corrosão generalizada é função do Ni_{eq} : os que apresentaram corrosão generalizada tinham Ni_{eq} mais elevado.

No sumo de limão + 3,5 NaCl, constatou-se um desempenho dos aços da série 200 e do aço 304 foi comparável.

Os demais dois produtos, o molho de tomate e o refrigerante mostraram-se pouco agressivos. Na massa de tomate, os aços 201(2) e 201(3), apresentaram início de ocorrência de corrosão por pite, fato não observado no aço 201(1), no aço 304 que apresentou algumas frestas, também incipientes. Para uma classificação adequada, acredita-se que seja necessária a realização de ensaios mais longos.

O ensaio em câmara úmida por 1 dia (24h) realizado para detecção de possíveis resíduos de ferramentas não revelou nenhum ponto de corrosão, indicando que todas as superfícies ensaiadas estavam isentas de contaminação metálica.

No ensaio de corrosão em câmara de névoa salina, em geral os aços de acabamento brilhante foram melhores, sendo os de melhor desempenho o 304 2B. Todos os aços do grupo 201 apresentaram desempenho muito menor do que o 304.

REFERÊNCIAS

- ASAMI, K.; HASHIMOTO, K.; SHIMODAIRA, S. AN XPS STUDY IRONCHROMIUM OF THE PASSIVITY OF A SERIES OF ALLOYS IN SULPHURIC ACID. **Corrosion Science**, v. 18, p. 151–160, 1978.
- FREIRE, L. et al. Electrochemical and analytical investigation of passive films formed on stainless steels in alkaline media. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 9, p. 1075–1081, 2012.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 360 p.
- INCO. **Corrosion Resistance of the Austenitic Chromium-Nickel Stainless Steels in Chemical Environments** INCO (Int Nickel Co, Inc) **Corros Man**, 1963.
- JAMBO, Hermano Cezar Medaber; FÓFANO, Sócrates. **Corrosão: fundamentos, monitoração e controle**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009. 342 p., il.
- KELLY, J. AGGEN, G. **Stainless Steels**. Myer Kuts Associates: Handbook of Materials Selection, 2001.
- MCGUIRE. **STAINLESS STEELS FOR DESIGN ENGINEERS**. [s.l: s.n.].
- MODENESI, P. J. **Soldabilidade de aços inoxidáveis**. Vol. 1. São Paulo: SENAI SP, 2001.
- OLDFIELD, J. W.; SUTTON, W. H. **Crevice corrosion of stainless steels: I. A mathematical model**. *British Corrosion Journal*, v. 13, n. 1, p. 13–22, 1978.
- PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão de equipamentos e estruturas metálicas**. [s.l: s.n.].
- TOIT, M. du and STEYN, H.G.: Comparing the Formability of AISI 304 and AISI 202 Stainless Steels, **Journal of Materials Engineering and Performance**, v.21, p1491- 1495, 2012.
- ZHAO, G. HUI et al. Effect of copper on edge cracking behavior and microstructure of rolled austenitic stainless steel plate. **Journal of Iron and Steel Research International**, v. 29, n. 2, p. 281–294, 2022.
- APERAM. **Inox de verdade**. site disponível em:
<https://inoxdeverdade.com.br/>. Acesso em 10 out. 2023