



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

VICTÓRIA CAVALCANTE BARROSO DA FONSECA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO ELETRÓLITO NA
RESISTÊNCIA À CORROSÃO DAS LIGAS UNS S41003 E ENDUR 300 EM NaCl
500 PPM

FORTALEZA

2022

VICTÓRIA CAVALCANTE BARROSO DA FONSECA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO ELETRÓLITO NA RESISTÊNCIA
À CORROSÃO DAS LIGAS UNS S41003 E ENDUR 300 EM NA₂CO₃ 500 PPM

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

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo

FORTALEZA

2022

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

- F748e Fonseca, Victória Cavalcante Barroso da.
Estudo da influência da temperatura do eletrólito na resistência à corrosão das ligas UNS S41003 e ENDUR 300EM NACL 500PPM / Victória Cavalcante Barroso da Fonseca. – 2022.
36 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.
1. Corrosão. 2. Temperatura. 3. Aço inoxidável martensítico. 4. ENDUR 300. I. Título.

CDD 669

VICTÓRIA CAVALCANTE BARROSO DA FONSECA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO ELETRÓLITO NA RESISTÊNCIA
À CORROSÃO DAS LIGAS UNS S41003 E ENDUR 300 EM NA₂CO₃ 500 PPM

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

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo

Aprovada em: 21 de julho de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Walney Silva Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha família, Liduina, Humberto, Léa,
Duda, Rodrigo, Ivna, Dacache, Hartemilce e
Nilton e ao meu namorado, Arthur.

AGRADECIMENTOS

A mim, primeiramente, por ter tido a força de chegar até aqui, tentando sempre dar o melhor que podia no desempenho acadêmico e por estar realizando o sonho de ser engenheira pela Universidade Federal do Ceará.

Aos meus primeiros colegas da graduação Bruno Ribeiro, Vitória Pereira, Ítala Santos e Dylan Santos, os quais se tornaram amigos que tenho muito carinho por toda troca e companheirismo nas disciplinas que fizemos juntos.

As minhas fiéis companheiras de estudo, Vitória Souza e Stephany Santos, amigas que me acompanharam em várias fases boas e ruins que as disciplinas nos proporcionaram, foram essenciais para que essa trajetória fosse mais leve e prazerosa.

Aos meus amigos de longa data, João Vitor Veloso, Danielly Gomes, Gabriela Thé, Beatriz Andrade e Ana Luísa Schiavo por sempre estarem comigo em todos os momentos.

Novamente, à minha família que sempre torceu por mim, que me incentivou e que celebrou comigo quando entrei, mesmo quando isso tudo era um sonho e a ansiedade do ENEM me dominava.

Aos amigos que adquiri nesse último semestre, que tornaram tudo mais leve e que compartilharam comigo as alegrias e dificuldades das disciplinas, principalmente, minha amiga Jaine que torceu por mim em todo momento.

Ao meu namorado, Arthur Studart, que nos últimos 4 anos me deu forças e me acalmou nos dias antecedentes às provas.

Aos colegas do Laboratório de Corrosão que me auxiliaram bastante ao longo do período em que estive executando meus ensaios, e um agradecimento especial ao Henrique Queiroz que me ajudou e orientou durante todo o processo, mostrando-se sempre disposto a tirar minhas dúvidas e explicar cada etapa detalhadamente.

Ao Prof. Dr. Walney Silva Araújo, pela excelente orientação e paciência com minhas entregas, obrigada professor por ter transformado esse trabalho em algo tranquilo e prazeroso de se estudar.

Ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão por ceder os equipamentos e o espaço para que eu pudesse executar meus ensaios de forma eficiente.

À empresa APERAM S.A. pelo fornecimento dos materiais que foram utilizados nesse estudo.

Aos professores participantes da banca examinadora Mauro Andres Cerra Florez e Jorge Luiz Cardoso pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

“Seja você quem for, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.” (SENNÁ, 1994).

RESUMO

A liga ENDUR 300 é recém desenvolvida e faz parte do grupo dos aços inoxidáveis de baixo carbono, a qual apresenta microestrutura majoritariamente martensítica. É comercializada, principalmente, para aplicação como um aço estrutural no intuito de substituir alguns aços carbono utilizados atualmente. O ENDUR 300 foi obtido a partir de um tratamento termomecânico aplicado na liga UNS S41003. O intuito deste trabalho foi estudar a influência da temperatura na resistência à corrosão, devido à escassez de informações na literatura, da liga ENDUR 300 em comparação com a liga UNS S41003. A metodologia do trabalho foi realizada nas seguintes etapas: Preparação das amostras; Realização dos ensaios eletroquímicos de potencial de circuito aberto, polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica; e caracterização da superfície das ligas após o processo de corrosão por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados obtidos mostraram que não houve alteração significativa na resistência à corrosão da liga ENDUR 300, o tratamento termomecânico provocou apenas alterações microestruturais e melhoras nas propriedades mecânicas. O principal tipo de processo corrosivo observado foi o de corrosão localizada, em ambas as ligas, devido à presença de pites após os ensaios de polarização. O efeito do aumento de temperatura, de modo geral, não causou influência significativa na resistência à corrosão da liga, porém o ENDUR 300 apresentou redução do potencial de pite (E_{pite}) e redução do arco capacitivo na impedância, quando submetido a temperaturas mais altas.

Palavras-chave: Corrosão; Temperatura; Aço Inoxidável Martensítico; ENDUR 300.

ABSTRACT

The ENDUR 300 alloy is newly developed and belongs to the group of low carbon stainless steels, which has a mostly martensitic microstructure. It is marketed mainly for application as a structural steel in order to replace some carbon steels currently used. ENDUR 300 was obtained from a thermomechanical treatment applied to the UNS S41003 alloy. The aim of this work was to study the influence of temperature on corrosion resistance, due to the scarcity of information in the literature, of the alloy ENDUR 300 in comparison with the alloy UNS S41003. The work methodology was carried out in the following stages: Sample preparation; Conducting open circuit potential electrochemical tests, potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy; and Characterization of the surface of the alloys after the corrosion process by means of Scanning Electron Microscopy (SEM). The results obtained showed that there was no significant change in the corrosion resistance of the ENDUR 300 alloy, the thermomechanical treatment caused only microstructural changes and improvements in mechanical properties. The main type of corrosive process observed was localized corrosion, in both alloys, due to the presence of pits after polarization tests. The effect of the increase in temperature, in general, did not cause a significant influence on the corrosion resistance of the alloy, but the ENDUR 300 showed a reduction of pitting potential ($E_{pitting}$) and a reduction of the capacitive arc in the impedance, when subjected to higher temperatures.

Keywords: Corrosion; Temperature; Martensitic Stainless Steel; ENDUR 300.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Esquemático da célula eletroquímica de três eletrodos.....	24
Figura 2	– Micrografia Eletrônica de Varredura a) UNS S41003 e b) ENDUR 300.....	27
Figura 3	– Potencial de Circuito Aberto em temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C....	28
Figura 4	– Curvas de Polarização Potenciodinâmica das ligas UNS S41003 e ENDUR 300 a temperaturas de a) 80°C, b) 50°C e 25°C.....	29
Figura 5	– Curvas de Polarização Potenciodinâmica das triplicatas para UNS S41003 e ENDUR 300 a temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C.....	30
Figura 6	– Micrografia Eletrônica de Varredura após polarização potenciodinâmica para a liga UNS S41003 nas temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C.....	32
Figura 7	– Micrografia Eletrônica de Varredura após polarização potenciodinâmica para a liga ENDUR 300 nas temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C.....	33
Figura 8	– Curvas de Nyquist obtidas dos ensaios EIE para as ligas UNS S41003 e ENDUR 300 a temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C.....	34
Figura 9	– Curvas de Nyquist das triplicatas para as ligas UNS S41003 e ENDUR 300 nas temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da liga UNS S41003.....	21
Tabela 2 – Composição química das ligas UNS S41003 e ENDUR 300	21
Tabela 3 – Média dos valores obtidos para as ligas UNS S41003 e ENDUR 300 de Potencial de Circuito Aberto em diferentes temperaturas.....	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo geral.....	16
2.2. Objetivos Específicos.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Corrosão.....	17
3.2. Aços Inoxidáveis.....	18
3.3. Aços Inoxidáveis Ferríticos.....	18
3.4. Aços Inoxidáveis Martensíticos.....	19
3.5. Aço Inoxidável UNS S41003.....	20
3.6. Aço Inoxidável ENDUR 300.....	20
3.7. Temperatura e Tratamento Térmico.....	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4.1. Ligas Metálicas.....	22
4.2. Preparação das Amostras.....	22
4.3. Testes Eletroquímicos.....	23
4.4. Eletrodo.....	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5.1. Microestrutura.....	26
5.2. Potencial de Circuito Aberto (OCP).....	27
5.3. Polarização Potenciodinâmica.....	28
5.4. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica.....	34
6. CONCLUSÃO.....	37
7. REFERÊNCIAS.....	38

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis fazem parte do grupo de ligas ferrosas que possuem o cromo em sua composição acima de 10,5% em massa, esta particularidade justifica a formação de uma camada de óxido, quando sujeita à ataques corrosivos, aderente ao metal base e compacta, chamada de passivação. Os sistemas mais comuns dessas ligas são Fe-Cr, Fe-Cr-C e Fe-Cr-Ni (MARQUES, 2021).

A formação dessa camada passiva nos aços inoxidáveis confere à liga uma notável resistência à corrosão e oxidação em temperaturas elevadas. Este é um dos fatores que aceleram o processo corrosivo dessas ligas, pois à medida que a temperatura aumenta o mesmo ocorre com a difusão de oxigênio na superfície do material. Outro fator que pode ser apontado como acelerador da corrosão é a concentração de íons cloreto no meio (QUEIROZ, 2021; JONES 1992).

Estes aços podem ser classificados quanto ao teor de carbono presente em sua composição, pois os de baixo teor de carbono apresentam microestrutura ferrítica, enquanto os de alto teor de carbono possuem microestrutura martensítica, já a austenita presente em alguns aços, muitas vezes, só é obtida devido à elementos de liga estabilizadores da austenita (DAVIS, 1994). Sendo assim, tem-se os seguintes tipos:

- Aços inoxidáveis ferríticos;
- Aços inoxidáveis austeníticos;
- Aços inoxidáveis martensíticos.

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) devido ao baixo teor de carbono que apresentam, isto garante a esses materiais propriedades magnéticas, resistência a corrosão sob tensão, a corrosão magnética e a oxidação. Faz parte desse grupo o aço UNS S41003, conhecido no Brasil como 410D, o qual apresenta composição química com baixa adição de elementos de liga em comparação, de certo modo, aos outros tipos de aços inoxidáveis (ARRUDA, 2021).

O 410D é uma liga de baixo carbono que possui adições de cromo entre 10,5% e 12,5% e de níquel em cerca de 1%. Apresenta boa resistência à abrasão e à corrosão, alta resistência mecânica e boa soldabilidade. O seu baixo custo dentro do grupo de aços especiais é visto como uma alternativa de substituição de alguns aços carbonos utilizados em aplicações estruturais e de desgaste, como no setor de transportes para aplicação em vagões e nas usinas sucroalcooleiras para recebimento e transporte da cana (APERAM, 2018).

Este baixo custo do 410D pode ser atribuído ao fato de possuir pouco teor de elementos de liga em sua composição, em que cromo, manganês, níquel e silício por apresentarem a

capacidade de formar óxidos de maior volume confere ao 410D uma desejável resistência à diferentes variações de temperatura. Nessa perspectiva, tais propriedades são bastante positivas para essa liga, visto que o UNS S41003 é aplicado em diversos meios atmosféricos: industriais, urbanos, marítimos e rural (CHIAVERINI, 1977; QUEIROZ, 2021).

A busca por aços especiais que se adequem melhor à certas aplicações faz com que sejam realizados estudos com o foco no desenvolvimento de novas ligas, o que pode ser obtido adicionando elementos de liga, submetendo ligas já existentes à algum tipo de tratamento térmico, e utilizando outras técnicas.

Sob esse viés, pode-se afirmar que o elo entre o baixo custo e as boas propriedades mecânicas que foram observadas, atribuiu ao UNS S41003 a capacidade de sofrer modificações para a obtenção de uma nova liga.

O ENDUR 300 contém cerca de 10,5% a 12% de cromo e baixo carbono, caracterizando-se como um aço inoxidável, este foi obtido a partir de um tratamento termomecânico aplicado à liga UNS S41003, o que resultou em uma microestrutura predominantemente martensítica. O procedimento realizado chamado de têmpera, consiste em um aumento gradual de temperatura até atingir valores maiores do que 937 °C para que seja possível obter uma microestrutura completamente austenítica, e após alguns processos de laminação à quente, para garantir o refinamento do grão, a liga foi submetida ao resfriamento brusco para que toda austenita presente se tornasse martensita (MARQUES, 2021).

Portanto, devido à escassez de informações na literatura acerca da liga recém desenvolvida e tendo em vista a importância da otimização dos materiais já utilizados atualmente, este trabalho tem o objetivo de analisar o impacto do tratamento termomecânico no comportamento eletroquímico e na resistência à corrosão da liga ENDUR 300 em solução de NaCl 500 ppm submetido a diferentes faixas de temperaturas do eletrólito, utilizando como referência a liga UNS S41003.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral:

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento eletroquímico da liga ENDUR 300 em solução de NaCl 500 ppm submetido a diferentes temperaturas do eletrólito.

2.2. Objetivos Específicos:

- Analisar a resistência à corrosão das ligas ENDUR 300 e UNS S41003 por meio de técnicas eletroquímicas de monitoramento de potencial de circuito aberto (OCP), polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica;
- Investigar a influência da temperatura do meio na taxa de corrosão em três condições ambientais: 80°C, 50°C e 25°C;
- Comparar os resultados obtidos para a liga ENDUR 300 com a liga UNS S41003;
- Caracterizar as superfícies das ligas antes e depois de submetê-las ao procedimento eletroquímico, utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV), com a finalidade de obter informações sobre o tipo de corrosão predominante.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Corrosão

Pannossian (1993) define, inicialmente, a corrosão como o processo inverso da metalurgia extrativa, em que o metal retorna ao seu estado original, ou seja, o minério do qual foi extraído. No entanto, esta definição é bastante simplificada e não engloba todas as peculiaridades que envolvem o conceito de corrosão.

Além disso, o processo corrosivo de um material ocorre a partir de uma reação química ou eletroquímica com o meio em que está inserido. Tal interação de materiais metálicos com soluções aquosas resulta em transferência de cargas elétricas que podem formar uma camada de óxido, como o que ocorre nos aços inoxidáveis (PANOSSIAN,1993; CHIAVERINI, 1977).

Em contrapartida, a corrosão nem sempre é classificada como um processo indesejado, pois há técnicas que utilizam desse processo com o intuito de proteger outro material mais nobre de sofrer oxidação, é o que se chama de proteção catódica (PANOSSIAN,1993).

Há vários tipos de corrosão que podem afetar os materiais metálicos, a corrosão por pites, por exemplo, se forma a partir de pontos de ruptura da camada de passivação do aço inoxidável (JONES,1994). Logo, esses “pontos” fragilizam o material a partir do aumento da profundidade do pite, pois ocupa diâmetros muito pequenos na superfície do metal quando o processo corrosivo começa a acontecer.

Essa ruptura do filme passivo presente nos aços inoxidáveis a partir da corrosão por pites ocorre em um potencial crítico denominado de potencial de pite (E_{pite}). A passivação, apesar de funcionar como uma barreira, ainda está susceptível a falhas na presença de íons cloreto (Cl^-) que comprometem essa camada de óxido devido à alta difusividade e eletronegatividade, além do pequeno diâmetro do íon, possibilitando essa corrosão pontual (MARQUES, 2021).

A velocidade em que ocorre o processo de corrosão é caracterizado como taxa de corrosão, a qual pode ser medida a partir de dois parâmetros: perda de massa por unidade de área e de tempo, e penetração por unidade de tempo. Esta última, é muito utilizada para verificar a taxa de corrosão por pites (CASCUDO; HELENA,1999).

Os materiais metálicos são submetidos a diferentes condições de trabalho. Então pelos motivos já apresentados, se faz necessário mapear o comportamento do material selecionado a partir da interação com o meio em que está inserido.

Este mapeamento torna possível aplicar técnicas de proteção para aumentar a vida útil dos metais e ligas observadas, além de possibilitar que seja escolhida uma condição de trabalho adequada, diminuindo ao máximo os custos existentes com manutenção e, até mesmo, com substituição de materiais que desgastam bastante em certas aplicações.

3.2. Aços Inoxidáveis

As ligas ferrosas que apresentam mais de 10,5% em massa de cromo em sua composição estão classificadas no grupo dos aços inoxidáveis. A presença do cromo na composição desses aços permite a formação de uma fina camada de óxido, aderente, que promove uma característica de resistência à corrosão (QUEIROZ, 2021).

Chiaverini (1977) declara que a ciência dos aços inoxidáveis é a ciência do cromo como elemento de liga no ferro, pois o aumento no teor de cromo é inversamente proporcional a corrosibilidade que o aço apresenta, isto é, diminui a tendência à oxidação.

Os aços inoxidáveis são classificados em 3 classes principais:

- Aços inoxidáveis austeníticos;
- Aços inoxidáveis ferríticos;
- Aços inoxidáveis martensíticos

Esses aços são de grande interesse para a engenharia, pois apresentam alta resistência à corrosão e à oxidação devido aos teores de cromo acima de 10%, propriedades mecânicas a altas temperaturas e tenacidade, como no caso dos aços inoxidáveis austeníticos (SILVA; PAULO ROBERTO MEI, 2010).

Chiaverini (1977) afirma que os aços inoxidáveis com cromo e níquel presentes em sua composição, chamados austeníticos, constituem os melhores tipos de aços resistentes à corrosão. Além disso, há a presença de outros elementos de liga nos aços inoxidáveis, como molibdênio, nióbio e manganês, que exercem influência sobre a microestrutura e comportamento da liga, visto que esses elementos podem ser estabilizadores das fases ferríticas ou austeníticas.

3.3. Aços Inoxidáveis Ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas ferrosas que possuem grandes quantidades de cromo como elemento de liga, podendo atingir até 30% em massa nessas ligas. Essa nomenclatura, deve-se ao fato de possuir baixo teor de carbono em torno de até 0,20% em massa, o que fornece uma microestrutura predominantemente ferrítica à temperatura

ambiente e não endurecíveis pelo tratamento térmico de têmpera (QUEIROZ, 2021; CHIAVERINI, 1977).

A estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) desses aços se deve à predominância da ferrita, a qual coincide com a estrutura do aço carbono ferrítico a temperatura ambiente e, nos aços inoxidáveis é estabilizada devido ao aumento do teor de cromo. Este grupo de aços apresentam, em geral, menor custo que os austeníticos e duplex, melhor estampabilidade e resistência à corrosão sob tensão, pites e galvânica em temperatura ambiente e até em temperaturas mais elevadas (MARQUES, 2021; QUEIROZ, 2021; ARRUDA, 2021).

Após o estudo do comportamento eletroquímico de um aço inoxidável de microestrutura ferrítica, observou-se uma formação limitada e redução considerável da camada de passivação, como também a presença de pites metaestáveis ocasionados pela presença de íons Cl^- (LITO; LITO, 2018).

O aço UNS S41003 faz parte desse grupo dos aços inoxidáveis ferríticos de baixo carbono, de poucas adições de níquel e de concentração de cromo entre 10,5% e 12,5%. Estes elementos proporcionam ao UNS S41003 um custo baixo comparativamente a outros aços especiais, além de resistência a ambientes abrasivos e corrosivos, boa resistência mecânica e boa soldabilidade (APERAM, 2018).

3.4. Aços Inoxidáveis Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos são caracterizados como ligas de Fe-Cr-C que apresentam teores de cromo entre 11,5% e 18% em massa. Já o teor de carbono deve ser suficiente para permitir que ocorra a transformação da ferrita em austenita quando submetido ao aquecimento gradual até atingir temperaturas acima de 940 °C, transformando-se em martensita durante o resfriamento brusco (CHIAVERINI, 1977; CARBÓ, 2008).

A quantidade de cromo, de carbono e o tratamento térmico o qual esse aço é submetido, a partir da velocidade de resfriamento, é o que ocasiona essa diferença microestrutural do aço. Visto isso, para cada concentração de carbono austenitizante, há uma concentração crítica de cromo ferritizante, que pode impedir a transformação martensítica durante a têmpera (QUEIROZ, 2021).

A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis martensíticos é boa, mesmo quando submetidos à ação do tempo, da água e de certas substâncias químicas, porém um maior

teor de carbono prejudica essa resistência que pode ser compensada pelo aumento no teor de cromo (CHIAVERINI,1977).

Outro fator responsável por essa considerável resistência à corrosão é a têmpera que evita a precipitação de carbonetos. Isso é evidenciado a partir de um estudo feito para analisar o impacto da temperatura de austenitização no comportamento eletroquímico de uma liga Fe-Cr-C, visto isso, foi constatado que maiores temperaturas resultaram em menor quantidade de carbonetos e distribuição homogênea do cromo, melhorando, assim, a resistência à corrosão (CHIAVERINI, 1977; MARQUES, 2021).

A combinação de elementos como alto cromo, baixo carbono e a presença de níquel aperfeiçoam a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis martensíticos, os quais são bastante aplicados em ambientes industriais. Tal área de aplicação exige dessas ligas boa resistência à tração, deformação, fadiga e corrosão (CHIAVERINI, 1977; QUEIROZ, 2021).

A liga UNS S41003 apresenta todas as condições necessárias para obtenção dessas características desejáveis, por esse motivo é que foi desenvolvida a liga ENDUR 300, a partir da têmpera, como uma melhor alternativa para a aplicação em ambientes estruturais que a liga inicial era aplicada.

Há testes em que a microestrutura martensítica apresentaram E_{pite} menor que a ferrítica e resistência à corrosão generalizada maior que a ferrítica, caso essa liga seja produzida por sinterização a laser (VILELA et al., 2019).

3.5. Aço Inoxidável UNS S41003

O aço inoxidável UNS S41003 apresenta microestrutura ferrítica devido ao baixo teor de carbono e adições de cromo e níquel, os quais combinados resultam na alta resistência mecânica e resistência em ambientes abrasivos e corrosivos que o material apresenta, além de boa soldabilidade.

Este inox é uma excelente opção para substituição de aços carbono, galvanizados ou aluminizados em aplicações estruturais e em diversos segmentos industriais, atrelando essas características ao baixo custo se comparado com outros aços especiais.

3.6. Aço Inoxidável ENDUR 300

O ENDUR 300, como a liga citada acima, é um aço inoxidável de baixo carbono com adição de cromo e níquel, e microestrutura martensítica obtida após realizar têmpera no UNS S41003. A temperatura de aquecimento foi de 937 °C para completa

austenitização da liga, seguida por laminação a quente para refinar os grãos devido ao processo de recristalização e por fim resfriamento rápido para adquirir completa formação da martensita.

A partir disso, o ENDUR 300 sofreu um incremento na resistência mecânica, porém manteve a tenacidade, soldabilidade e capacidade de conformação a frio. Assim, este aço inox é aplicado, por exemplo, em vagão de carga ferroviário, indústria alimentícia e transporte de minerais, aumentando a vida útil dos equipamentos, reduzindo custos e tempos de manutenção devido às características adquiridas.

3.7. Temperatura e Tratamento Térmico

Têmpera é um tipo de tratamento térmico utilizado para aumentar certas propriedades do material submetido a esse processo, como dureza e resistência à tração. Basicamente, esse procedimento consiste em aquecer o material em temperaturas mais elevadas do que a temperatura crítica, para obter a estrutura completamente austenítica, e depois realizar um resfriamento brusco que pode ser em água, óleo, salmoura ou ar (CHIAVERINI, 1977).

A temperatura nesse caso executa um papel crucial envolvendo a susceptibilidade à corrosão e a etapa de homogeneização da austenita. A formação de um óxido na superfície de um metal pode ser prevista a partir da variação da energia livre de Gibbs, o qual determina termodinamicamente se a reação entre o metal e o meio em que está inserido irá ocorrer de forma espontânea ou não (ARRUDA, 2021).

Pode-se determinar que a reação irá acontecer espontaneamente se o valor da variação da energia livre de Gibbs for menor que zero. Normalmente, os materiais são encontrados na natureza na forma de óxidos, logo, pode-se afirmar que a reação de oxidação ocorre de forma espontânea nesses casos, atestando o fato citado no tópico 3.1 de que o processo corrosivo é o retorno do metal ao seu estado original (ARRUDA, 2021).

A temperatura então é o principal aspecto da têmpera, pois o estudo sobre a influência dos tratamentos térmicos de têmpera no comportamento mecânico do aço inoxidável ferrítico do tipo UNS S41003 atesta que, quanto maior o tempo de tratamento e a temperatura de austenitização intercrítica, maior é a quantidade de martensita formada depois do resfriamento. Logo, quanto maior o tempo que o aço permanece nessa temperatura se obtém maior fração da fase austenítica desejada, conseqüentemente, mais martensita será produzida pelo resfriamento (ABM PROCEEDINGS, 2019).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Ligas Metálicas

As ligas UNS S41003 e ENDUR 300 fazem parte do grupo dos aços inoxidáveis, os quais apresentam na composição química como mostrado na Tabela 1, dados os quais foram fornecidos pela empresa Aperam South América (APERAM, 2018).

Valores segundo norma ASTM A240/A240M referentes ao aço UNS S41003

Tabela 1 – Composição química da liga UNS S41003.

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	N
(% em massa)	0,03	1,50	1,00	10,5 - 12,5	1,00	0,04	0,015	0,03

Fonte: Aperam, 2018.

Segundo Queiroz (2021) após testes realizados para determinar a composição química de cada liga, identificou-se pequenas divergências nos valores que foram fornecidos na Tabela 1 e, como esperado, os aços UNS S41003 e ENDUR 300 apresentaram valores semelhantes de composição química mostrados na Tabela 2.

É importante salientar que a porcentagem de carbono não está presente na Tabela 2, se comparada com a Tabela 1, porque o teor de carbono entre as ligas não sofre alteração, visto que o UNS S41003 foi apenas submetido ao tratamento termomecânico de têmpera.

Tabela 2 – Composição química das ligas UNS S41003 e ENDUR 300.

Material	Elemento	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Fe
UNS S41003	%(m/m)	0,517	0,727	10,90	0,376	0,064	0,014	bal.
ENDUR 300	%(m/m)	0,576	0,672	10,99	0,398	0,092	<0,010	bal.

Fonte: Queiroz, 2021.

A variação identificada entre os elementos dos materiais UNS S41003 e ENDUR 300, possivelmente, é por causa de heterogeneidades intrínsecas provenientes do processamento dessas ligas. O cromo apresentou teores, relativamente, baixos em relação às demais ligas dos grupos dos aços inoxidáveis, porém ainda está dentro da faixa determinada pela literatura e acima do limite inferior de classificação desses aços, como citado no item 3.2 (QUEIROZ, 2021).

4.2. Preparação das amostras

Os materiais utilizados foram disponibilizados pela empresa Aperam South América em placas de dimensões 300 mm x 250 mm x 4,85 mm e 350 mm x 200 mm x 4,75 mm para os aços inoxidáveis UNS S41003 e ENDUR 300, respectivamente.

O início do processo de preparação das amostras se deu com o corte destes materiais em uma máquina cut-off do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) na Universidade Federal do Ceará, pois estavam em grandes dimensões para realização dos ensaios. Dessa forma, obteve-se seis amostras de dimensões 10 mm x 10 mm, mantendo a espessura de cada liga, sendo três para o UNS S41003 e três para o ENDUR 300.

A etapa seguinte da preparação foi o acoplamento de fios de cobre em cada uma para fornecer o contato elétrico, seguido da etapa de embutimento a frio em resina epóxi das seis amostras, após a curagem da resina foi feito o lixamento dos materiais em lixas d'água com granulometria de 220, 400, 600 e 1200 para obter a superfície adequada exigida na realização dos ensaios.

Por fim, foi determinada a área de análise, em torno de 62 mm², e tiradas fotos no microscópio óptico em aumentos de 5x, 10x, 20x e 50x, apenas com a finalidade de observar os impactos superficiais nas duas amostras antes e depois de submetê-las ao procedimento.

O eletrólito utilizado nos testes eletroquímicos foi uma solução de NaCl, utilizando água destilada para obter a concentração de 500 ppm, com a finalidade de simular um ambiente moderadamente agressivo contendo íons de Cl⁻, visto que na literatura se considera um ambiente agressivo a partir desta concentração.

A escolha dessa solução foi em decorrência da relação desses íons com o processo corrosivo dos aços inoxidáveis e, conseqüentemente, a fragilização da camada passiva citado no item 3.1 deste trabalho.

4.3. Testes eletroquímicos

4.3.1. Potencial de Circuito Aberto

Um sistema se encontra em estado estacionário quando adquire um potencial no qual as reações anódicas e catódicas acontecem na mesma taxa, isto é o que caracteriza o Potencial de Circuito Aberto (OCP), também chamado de potencial de corrosão (E_{corr}).

O OCP indica a tendência termodinâmica da oxidação de um metal em meio corrosivo, pois relaciona-se com a reatividade superficial do aço e o poder de oxidação da solução (MARQUES, 2021).

Neste trabalho, o OCP precedeu todas as outras técnicas eletroquímicas. Sendo assim, foi realizado com duração de 3600 segundos, pois o objetivo era submeter o material a um tempo suficiente para se obter a estabilização do OCP, e a aferição de potencial foi a cada 0,1 segundo.

4.3.2. Polarização Potenciodinâmica

Um potencial de equilíbrio se estabelece na dupla camada elétrica, caracterizando a reação de um dado eletrodo, quando a reação atinge condições de equilíbrio. Caso ocorra alguma alteração nesse potencial, por um fator externo, significa que o eletrodo sofreu polarização (CASCUDO; HELENA,1999).

A polarização potenciodinâmica significa percorrer um potencial em velocidade constante, visto que se a velocidade de varredura for o mais lento possível se pode obter dados próximos ao estado estacionário (MARQUES, 2021).

As curvas potenciodinâmicas consistem em uma transição para polarização anódica (sobrepotencial positivo), em que na região catódica (sobrepotencial negativo) o potencial começa a aumentar até atingir o potencial de corrosão (E_{corr}) para valores mais positivos (CASCUDO; HELENA,1999).

Nesse processo, há o aumento da taxa de corrosão devido ao aumento da densidade de corrente até que a camada passivante começa a se formar, nesta região a corrente decresce bruscamente e não ocorre mudança mesmo com o aumento do potencial. Por fim, esse aumento de potencial resulta na desestabilização da camada passiva e consequente aumento de corrente, caracterizando a região transpassiva a qual tem fim quando se atinge potencial de pite (E_{pite}) e o processo corrosivo se inicia (CASCUDO; HELENA,1999; MARQUES, 2021).

A faixa de potencial determinado para este trabalho foi de -0,25V até 1V - para que fosse possível observar a transição do sobrepotencial graficamente em cada região - com referência ao potencial de OCP (E_{corr}) e velocidade de varredura de 0,001V/s, baixa o suficiente para que apenas os valores obtidos nas reações fossem medidos, sem qualquer interferência dos valores de corrente e sobrepotencial do ensaio.

4.3.3. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

A definição básica da impedância de um circuito elétrico é a resistência em que um sinal elétrico, corrente ou potencial, enviado ao circuito encontra ao ter que percorrê-lo (CASCUDO; HELENA,1999).

O monitoramento e estabilização do OCP realizado durante uma hora precedeu o ensaio de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica em que foram utilizadas frequências entre 40 kHz e 0,01 Hz, amplitude de 0,01V e taxa de leitura de 5 pontos por década.

Importante destacar que o valor da impedância interfere na taxa de corrosão do sistema, pois o sistema adquire caráter mais passivo, isto é, maior restrição à passagem de corrente para maior valor de impedância, resultando em uma taxa de corrosão mais baixa possível. Inversamente, a taxa de corrosão será maior se a impedância for mais alta, ou seja, menor restrição à condução de corrente (CASCUDO; HELENA,1999).

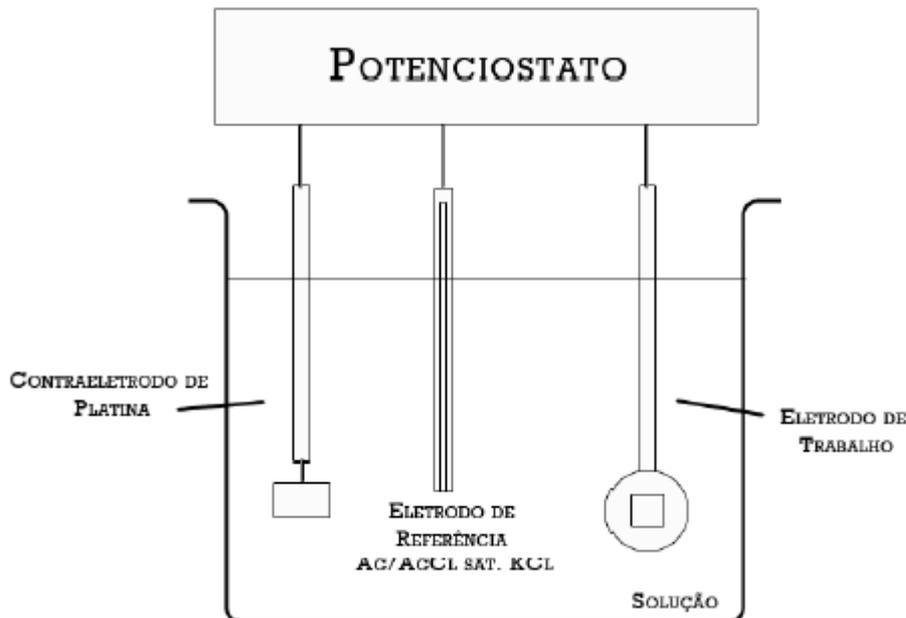
A partir da finalização dos ensaios e da obtenção dos dados, foi possível adquirir informações sobre a resistência à polarização apresentada pela amostra com a construção dos Gráficos de Nyquist.

4.4. Eletrodo

Segundo Cascudo (1999), eletrodo é um material que forma uma dupla camada elétrica (DCE), em regime estacionário. A DCE se trata do arranjo de partículas carregadas existentes em qualquer interface do material que está imerso em meio aquoso.

Neste contexto, os ensaios foram realizados utilizando três eletrodos na célula eletroquímica: o eletrodo de trabalho (ligas UNS S41003 e ENDUR 300), o eletrodo de referência de prata-cloreto de prata (Ag/AgCl) e contra eletrodo de platina, conforme mostrado na figura 1.

Figura 1 – Esquemático da célula eletroquímica de três eletrodos.



Fonte: Queiroz, 2021

Como citado no tópico 4.2 o eletrólito utilizado nessa célula foi uma solução de NaCl a 500 ppm e as temperaturas de trabalho do eletrólito foram 80°C, 50°C e 25°C para simular condições em que o UNS S41003 e o ENDUR 300 serão submetidos.

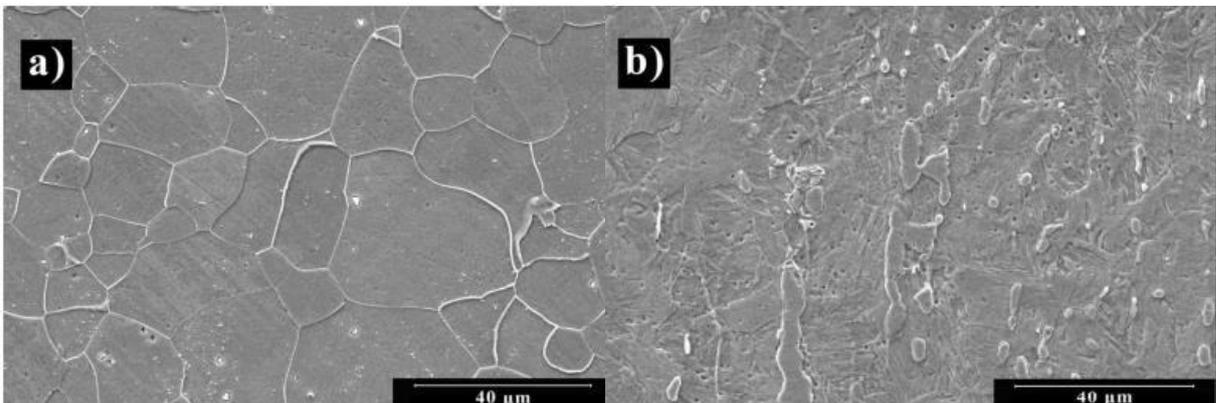
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Microestrutura

Aços inoxidáveis Fe-Cr de baixo carbono, dependem da concentração de cromo e da velocidade de resfriamento para adquirir diferentes tipos de microestrutura. Sendo assim, é possível se obter em uma liga estrutura ferrítica, martensítica e, até mesmo, simultaneamente ferrítica e martensítica (MARQUES, 2021).

A Figura 2 mostra a micrografia eletrônica de varredura, após ataque químico com reagente Vilela, da liga UNS S41003, a qual possui microestrutura predominantemente ferrítica, e da liga ENDUR 300, que após o processo de têmpera adquiriu microestrutura totalmente martensítica.

Figura 2 – Micrografia Eletrônica de Varredura de a) UNS S41003 e b) ENDUR 300.



Fonte: Queiroz, 2021

A microestrutura do aço inox UNS S41003 apresenta grãos maiores e mais equiaxiais, característico da estrutura ferrítica. Por outro lado, o aço inox ENDUR 300 apresentou microestrutura de grãos alongados e refinados, com aparência em forma de agulhas, o que caracteriza a estrutura tipicamente martensítica.

O tratamento termomecânico o qual a liga UNS S41003 foi submetido se trata de um processo adifusional e por este motivo os grãos de martensita sofrem nucleação e crescimento a uma taxa tão rápida que justifica a aparência alongada, semelhante a agulhas, dos grãos de martensita. (CALLISTER, 2013)

Assim, é possível atestar que a têmpera realizada no material original foi bem-sucedida, visto que o ENDUR 300 adquiriu mudanças microestruturais significativas e, principalmente, alterações de suas propriedades mecânicas.

5.2. Potencial de Circuito Aberto (OCP)

Na Tabela 3 é possível observar o valor da média e desvio padrão obtido no ensaio de potencial de circuito aberto (OCP) e na Figura 3 é apresentado graficamente o comportamento das ligas UNS S41003 e ENDUR 300 em solução de NaCl 500 ppm, as quais foram monitoradas durante 3600 segundos e realizados em triplicatas.

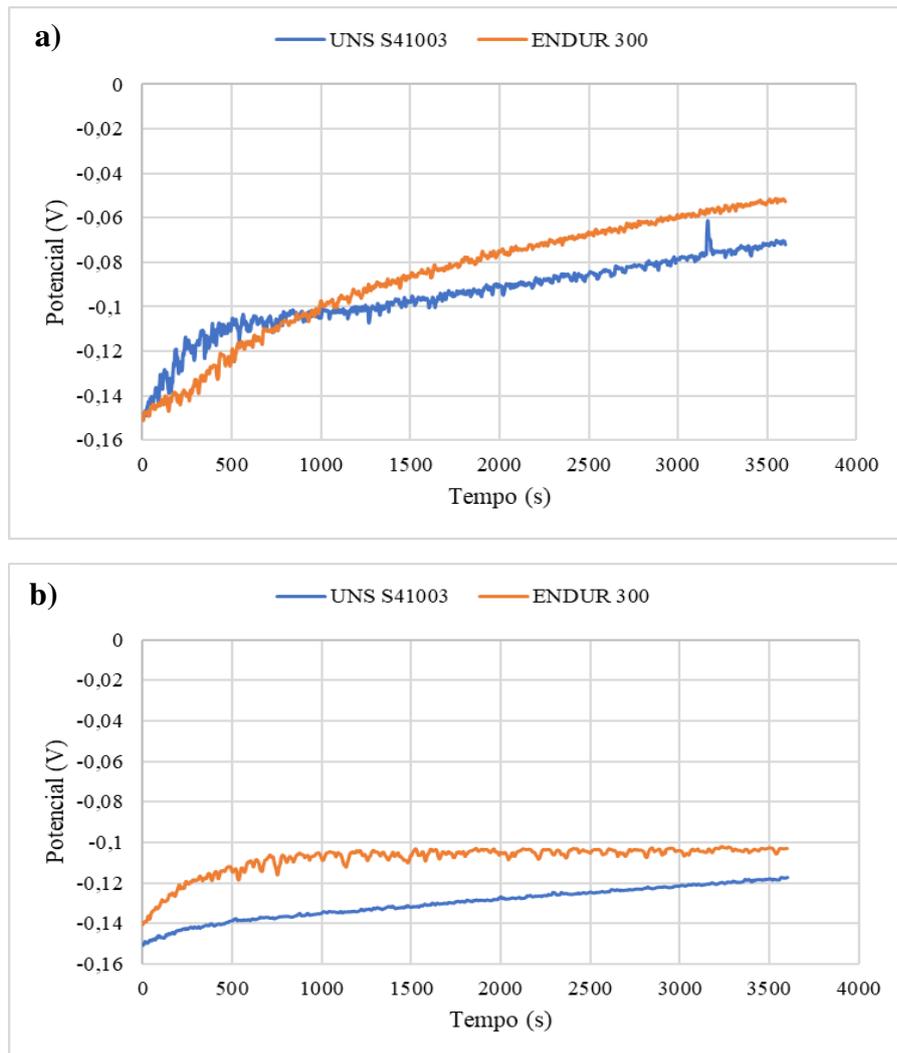
A partir destes dados, pode-se afirmar que os materiais possuem comportamento semelhante, ou seja, o tratamento termomecânico e o aumento da temperatura até 80 °C não causaram impactos significativos na atividade superficial das ligas.

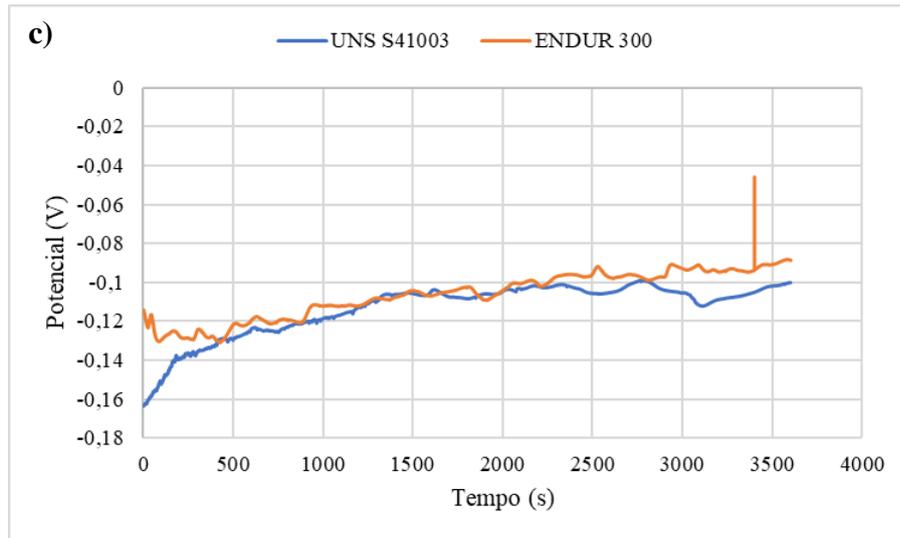
Tabela 3 – Média dos valores obtidos para as ligas UNS S41003 e ENDUR 300 de Potencial de Circuito Aberto em diferentes temperaturas.

Material/Temperatura	80°C	50°C	25°C
UNS S41003	-0,071±0,004	-0,112±0,009	-0,116±0,010
ENDUR 300	-0,082±0,035	-0,120±0,016	-0,102±0,012

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3 – Potencial de Circuito Aberto em temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C.





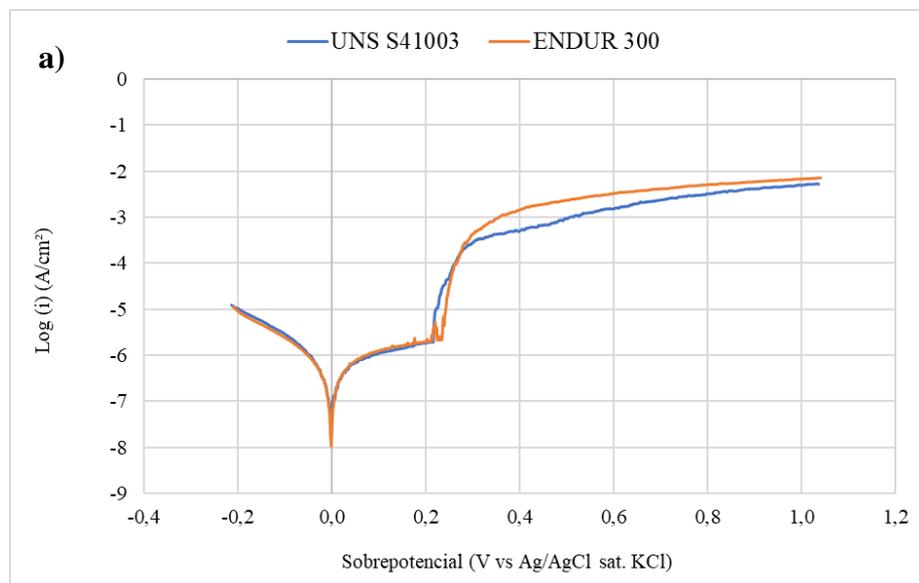
Fonte: Elaborado pela autora.

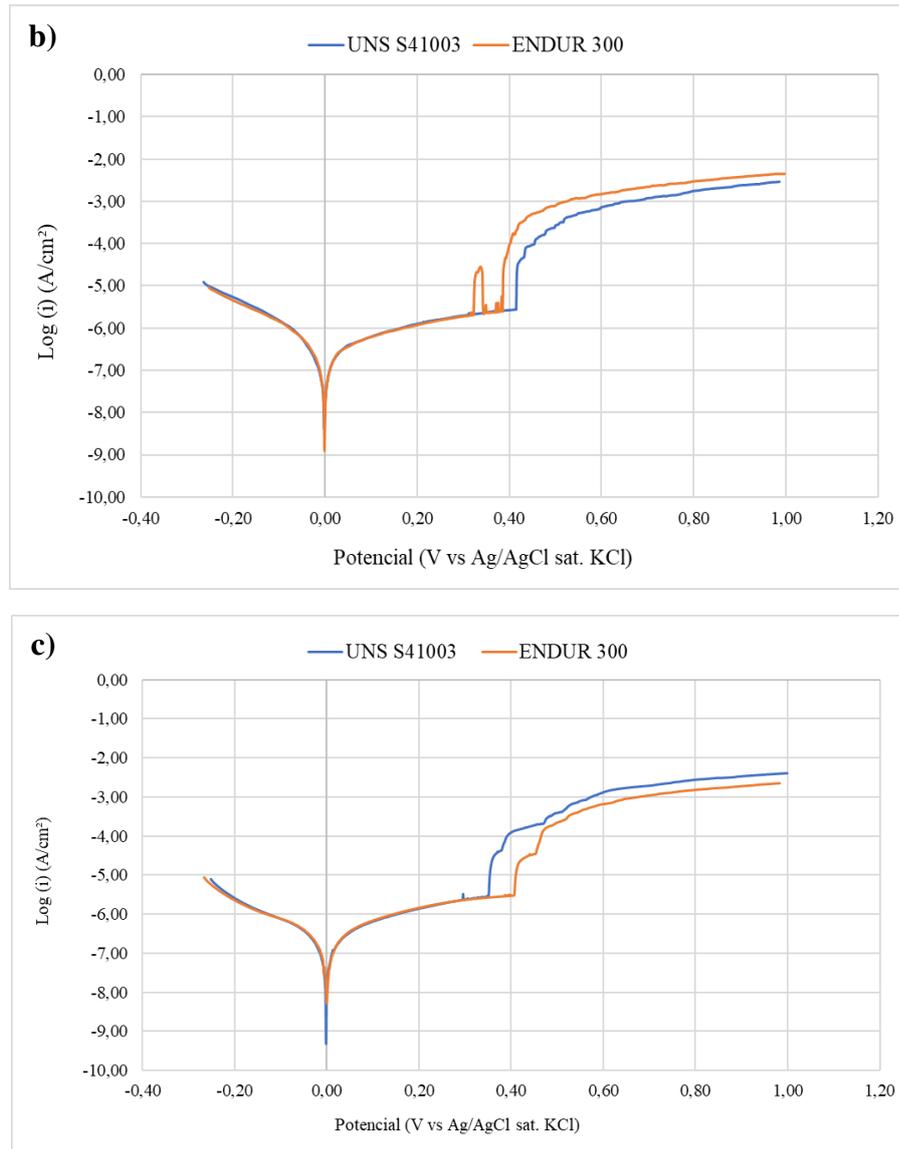
5.3. Polarização Potenciodinâmica

As curvas de polarização potenciodinâmica para aços inoxidáveis possuem as seguintes regiões: ativa, passiva, potencial de pite e transpassiva. À medida que o potencial se torna mais positivo e a corrente aumenta, há maior susceptibilidade do material sofrer corrosão, porém a camada de passivação formada tende a retardar esse processo inicia quando a curva atinge o potencial de pite (E_{pite}) (MARQUES, 2021; CASCUDO, 1999).

A Figura 4 mostra as curvas de polarização dos aços inoxidáveis UNS S41003 e ENDUR 300 em solução de NaCl 500 ppm submetido às temperaturas de 80 °C, 50 °C e 25 °C, os quais foram realizados em triplicatas.

Figura 4 – Curvas de Polarização Potenciodinâmica das ligas UNS S41003 e ENDUR 300 a temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e 25 °C.





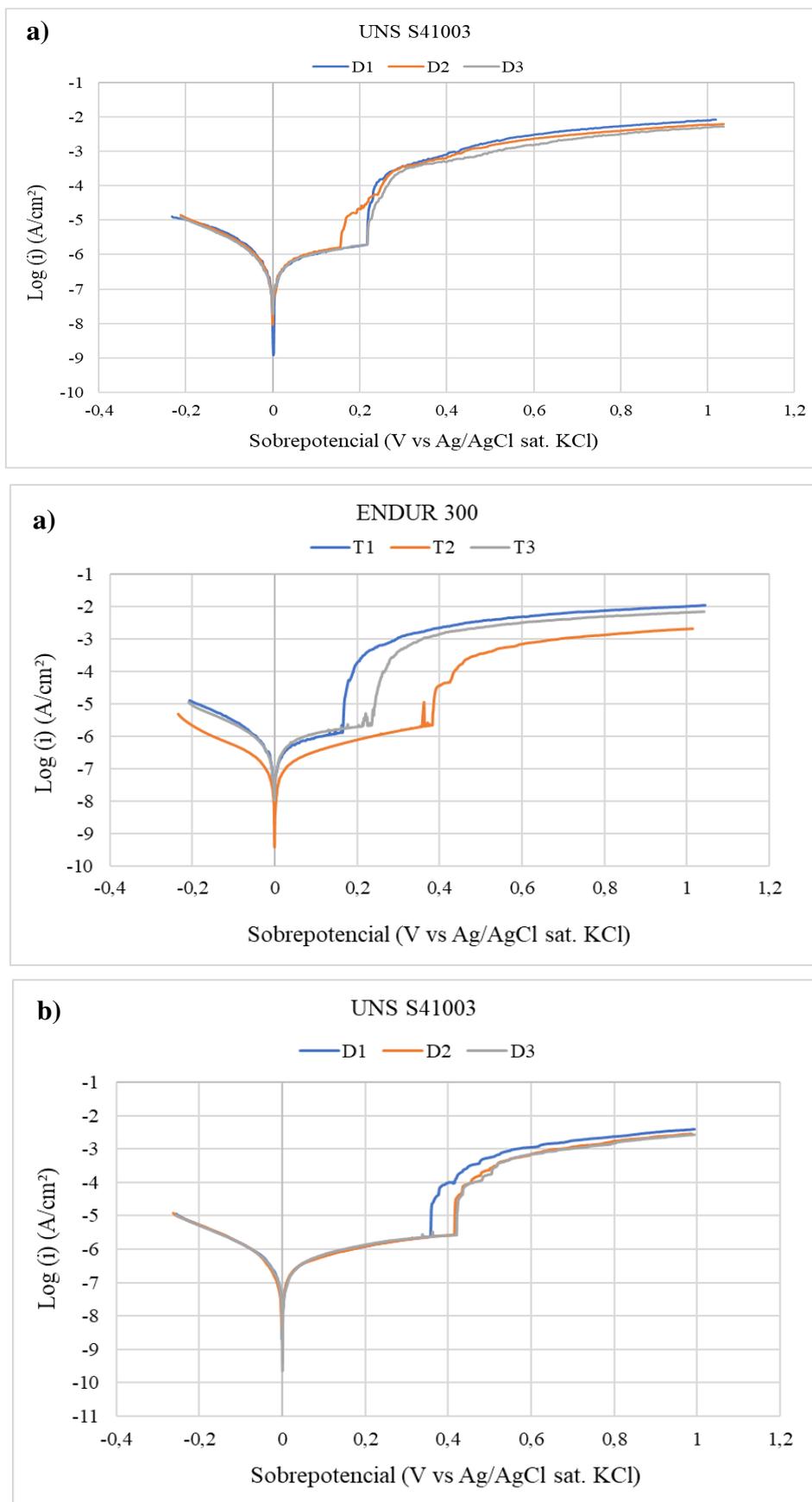
Fonte: Elaborado pela autora.

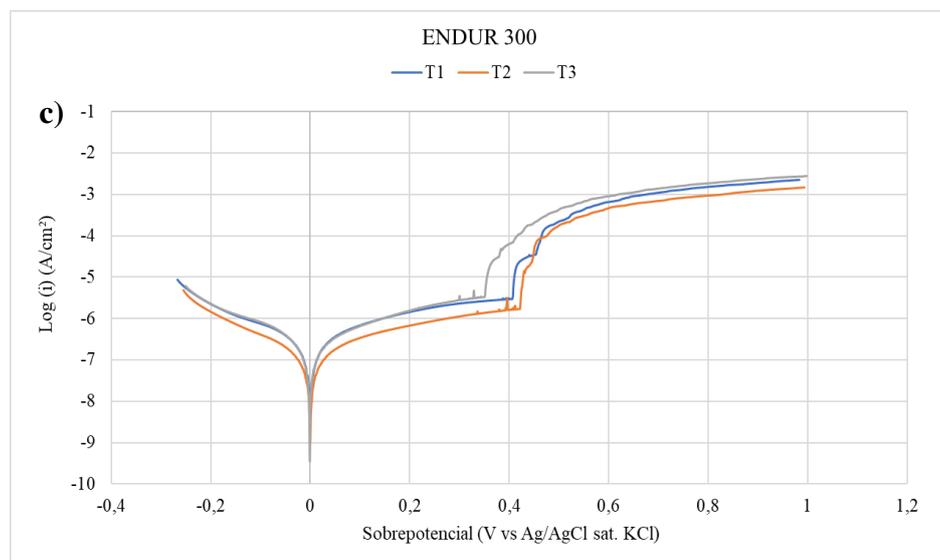
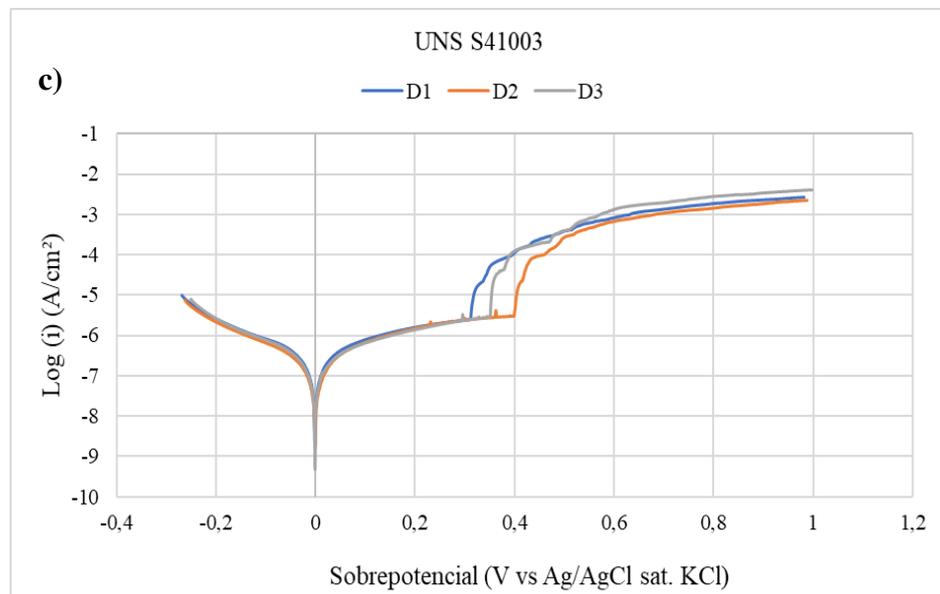
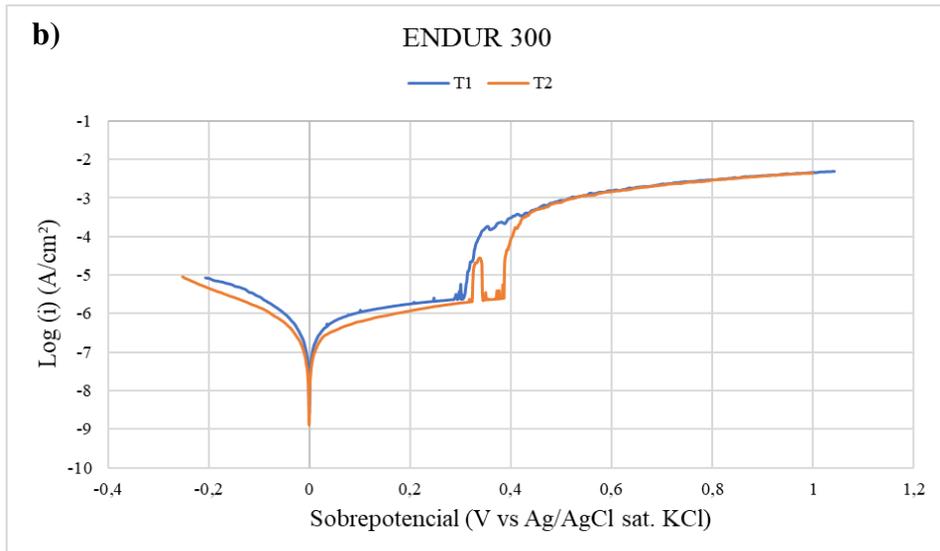
Novamente, os materiais apresentaram resultados bastante semelhantes quando submetidos às mesmas condições, principalmente nas temperaturas de 80 °C e 25 °C, porém o ENDUR 300 apresentou menor potencial de pite ($E_{pite} \approx 0,33V$) à temperatura de 50 °C, enquanto o UNS S41003 obteve $E_{pite} \approx 0,40V$.

Em contrapartida, para aplicações à temperatura ambiente ($T = 25\text{ °C}$) o Endur 300 mostrou maior potencial de pite $\approx 0,40V$ se comparado ao UNS S41003. Este comportamento e a morfologia de corrosão presente nas micrografias atestam que o material sofre um processo de formação da camada passiva e o seu rompimento se dá por corrosão localizada.

Na Figura 5 é possível observar comparativamente o comportamento das triplicatas nas diferentes temperaturas de 80 °C, 50 °C e 25°C. Os resultados da Figura 4 foram obtidos escolhendo a curva mais estável entre as três obtidas.

Figura 5 – Curvas de Polarização Potenciodinâmica das triplicatas para UNS S41003 e ENDUR 300 nas temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C.



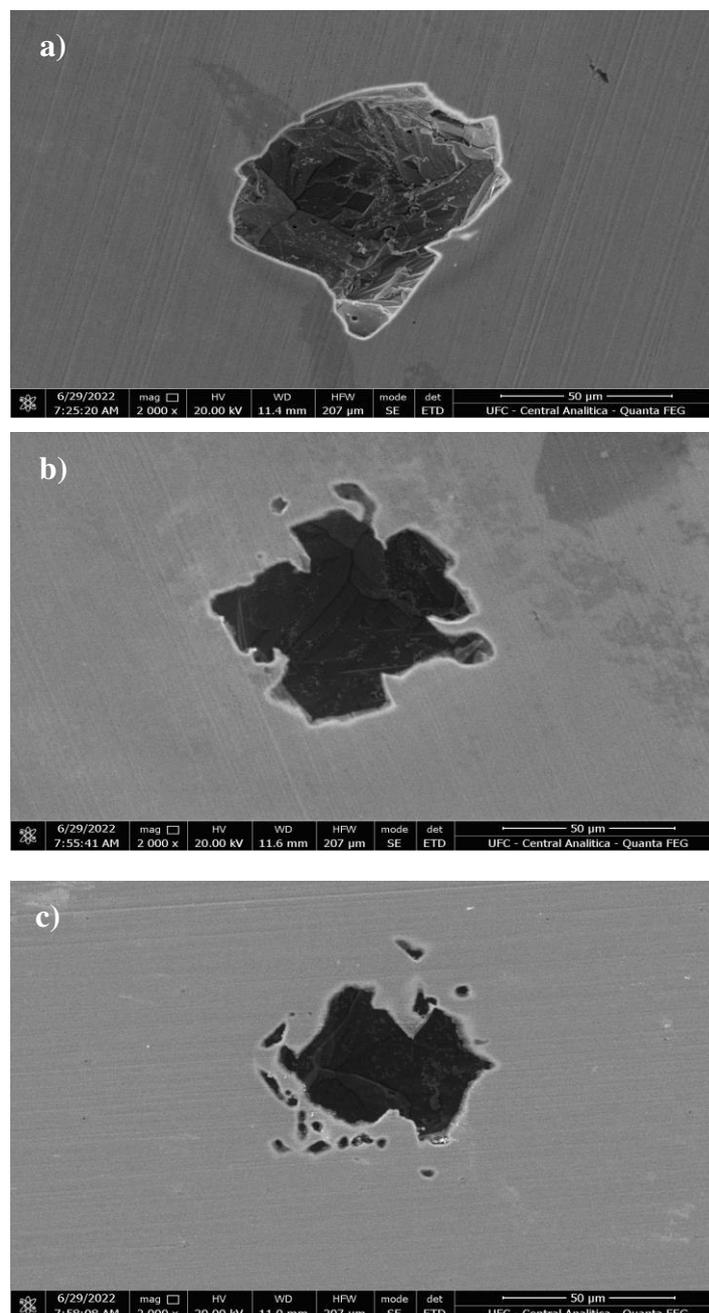


Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 5, o gráfico do ENDUR 300 na temperatura de 50 °C representa apenas duas amostras, pois o resultado da T3 apresentou dados inconsistentes, provavelmente, devido à sensibilidade do ensaio que pode ter sofrido perturbação no meio de trabalho e na amostra.

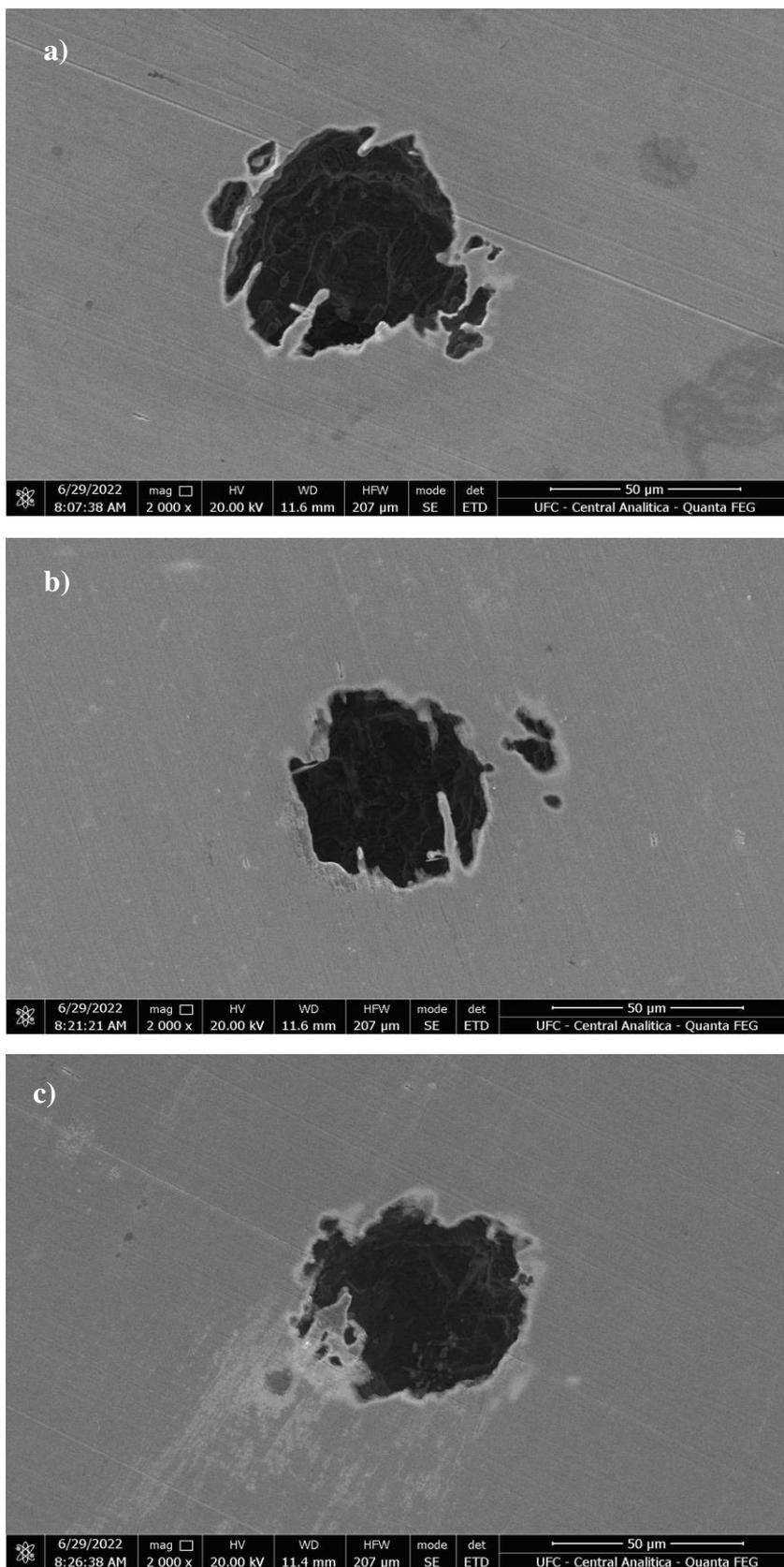
Nas Figuras 6 e 7 é possível observar com clareza o pite de corrosão formado após os ensaios de polarização em diferentes temperaturas (80 °C, 50 °C e 25 °C) e em solução NaCl 500ppm, imagens foram obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Figura 6 – Micrografia Eletrônica de Varredura após polarização potenciodinâmica para a liga UNS S41003 nas temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 7 - Micrografia Eletrônica de Varredura após polarização potenciodinâmica para a liga ENDUR 300 nas temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C.



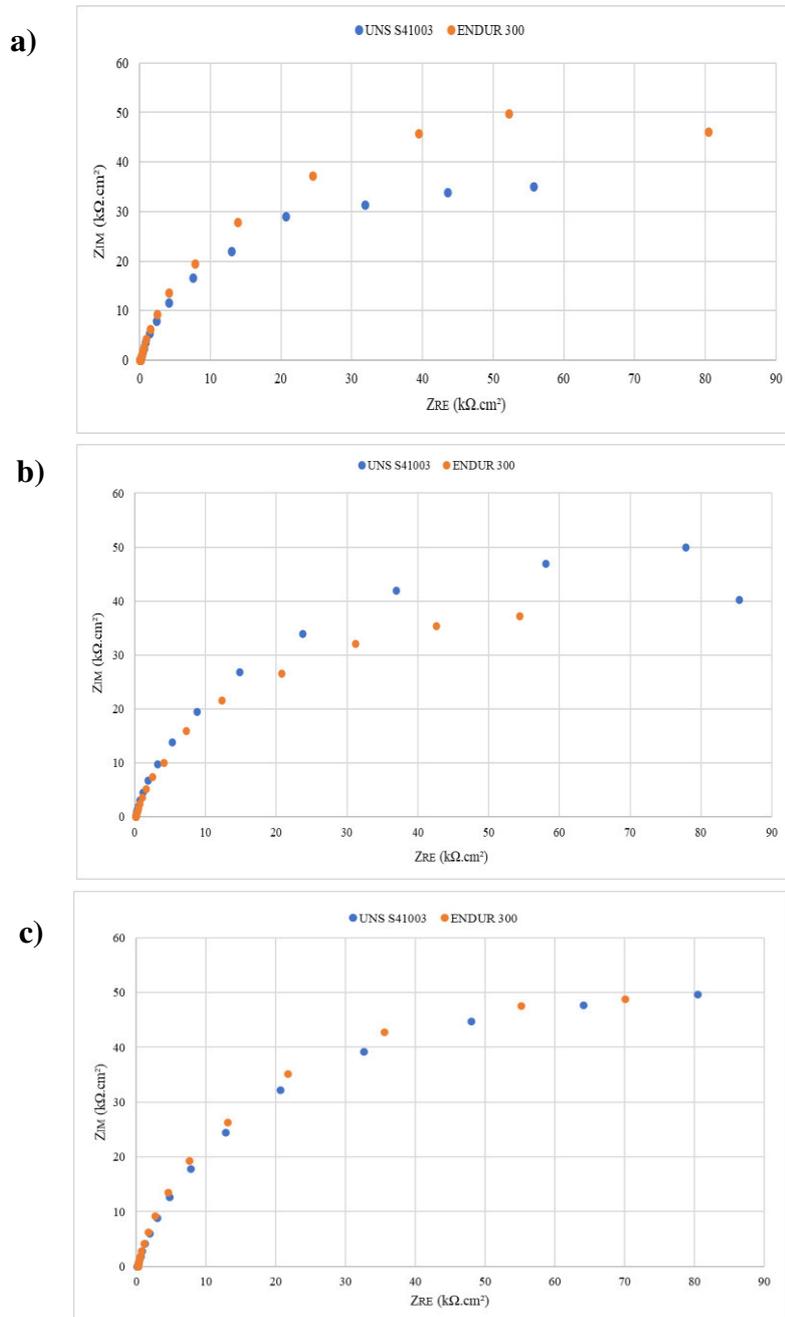
Fonte: Elaborado pela autora.

5.4. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

Os gráficos de Nyquist que foram obtidos após o ensaio de EIE estão apresentados na Figura 8, evidenciando o comportamento semelhante das ligas mais uma vez.

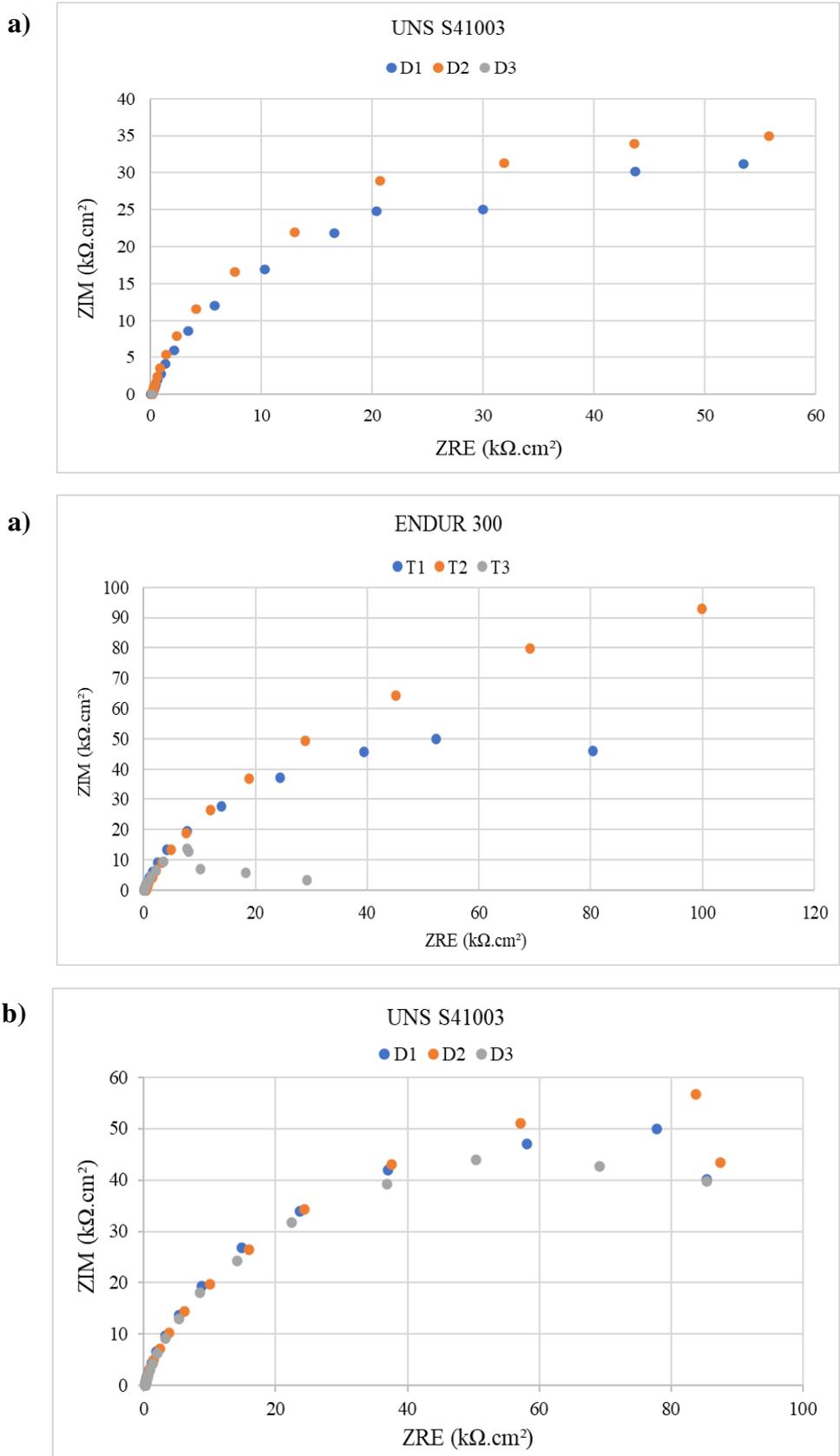
Neste procedimento, nota-se que as amostras submetidas a 25°C apresentaram um arco capacitivo maior e houve retração desse arco à medida que a temperatura aumentou, atestando a perda de resistência quanto maior for a temperatura a qual o material é submetido.

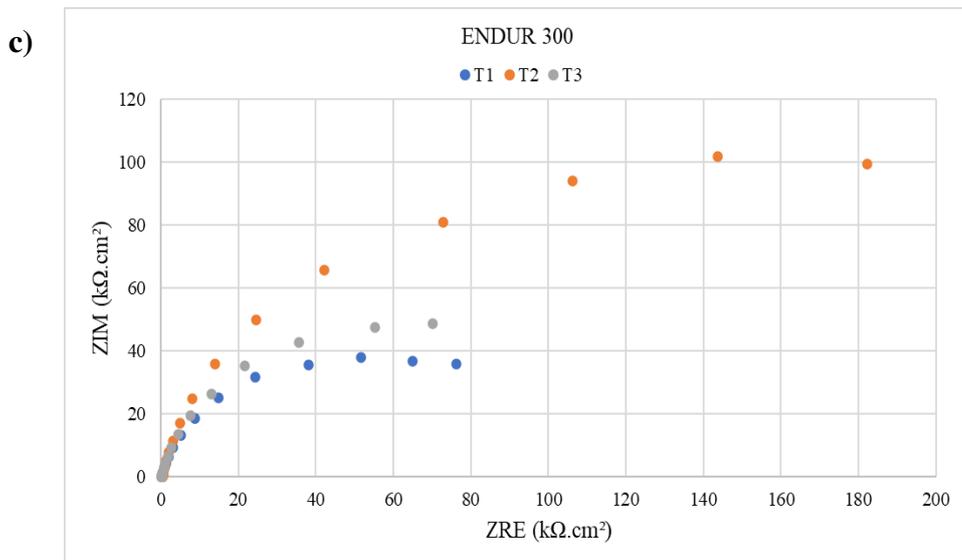
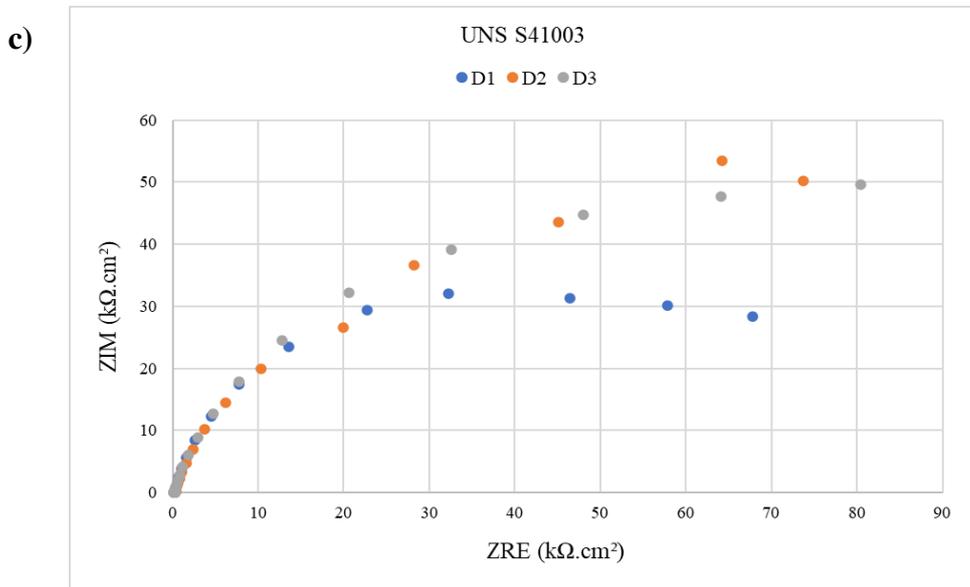
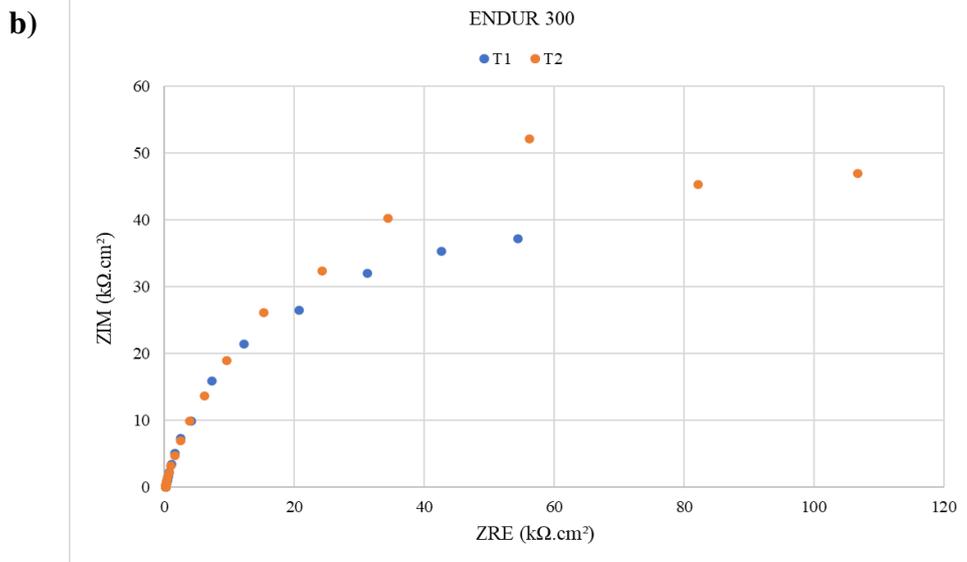
Figura 8 – Curvas de Nyquist obtidas dos ensaios EIE para as ligas UNS S41003 e ENDUR 300 a temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 9 – Curvas de Nyquist das triplicatas para as ligas UNS S41003 e ENDUR 300 nas temperaturas de a) 80 °C, b) 50 °C e c) 25 °C.





Fonte: Elaborado pela autora.

6. CONCLUSÃO

- A mudança de microestrutura foi observada entre as ligas, atestando que o tratamento termomecânico foi realizado com sucesso, visto que a liga UNS S41003 apresenta grãos equiaxiais típicos da estrutura ferrítica e após a têmpera apresentou grãos alongados, em forma de agulhas, característica marcante da microestrutura martensítica e que se encontra comumente em aços baixo carbono temperados.
- Os resultados obtidos nos ensaios de Potencial de Circuito Aberto (OCP), Polarização Potenciodinâmica e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) mostraram que não houve diferença significativa no comportamento da liga ENDUR 300 se comparada à liga UNS S41003, evidenciando que a resistência à corrosão se manteve nos parâmetros anteriores mesmo após o tratamento termomecânico.
- A micrografia obtida pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) comprova o tipo de corrosão esperado nas ligas UNS S41003 e ENDUR 300, visto que aços inoxidáveis apresentam preferencialmente corrosão localizada por pites devido à formação do filme passivante.
- O ENDUR 300 apresentou maior resistência à corrosão que o UNS S41003 quando submetido à temperatura ambiente de 25 °C, comprovado pelo maior potencial de pite e maior arco capacitivo. No entanto, o potencial de pite da liga ENDUR 300 se tornou menor que o da liga UNS S41003 na temperatura de 50 °C.
- De modo geral, os resultados obtidos atestam que o tratamento termomecânico foi realizado com êxito, visto que a liga ENDUR 300 adquiriu melhores propriedades mecânicas e manteve a capacidade de resistência à corrosão praticamente inalterada nas variações de temperatura propostas.

REFERÊNCIAS

ABM Proceedings - INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS DE TÊMPERA COM AUSTENITIZAÇÃO INTERCRÍTICA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO DO TIPO UNS S41003. Disponível em:

<<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/influncia-de-tratamentos-trmicos-de-tmpera-com-austenitizao-intercritica-no-comportamento-mecnico-de-um-ao-inoxidvel-ferrtico-do-tipo-uns-s41003>>. Acesso em: 2 jul. 2022.

ARRUDA, A. A. F. Efeito da temperatura sobre o comportamento mecânico e oxidação do aço inoxidável ferrítico UNS S41003 (410D). www.repositorio.ufop.br, 2021.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio De Janeiro: Ltc, 2013.

CARBÓ, Héctor Mario. Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações. **São Paulo: ArcelorMittal Brasil**, v. 29, 2008.

https://www.academia.edu/download/35263369/Apostila_aco_inox_Arcelor_Mittal.pdf. Acesso em: 01 jul 2022.

CASCUDO, O.; HELENA, P. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia, Go, 1999.

CHIAVERINI, V.; DE, B. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: Abm, 1977.

Composição química (% em peso). [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/Aperam%20-%20Ficha%20T%C3%A9cnica%20ENDUR%20300.pdf>>. Acesso em: 1 jul. 2022.

DAVIS, J. R.; ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE. **Stainless steels**. Materials Park, Ohio: Asm International, 1994.

DIN WS 1.4003/UNS S41003 Aço Inoxidável Ferrítico para aplicações estruturais e de desgaste Composição Química Propriedades Mecânicas. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/DIN-WS-1.4003UNS-S41003-A%C3%A7o-Inoxid%C3%A1vel-Ferr%C3%ADtico-para-aplica%C3%A7%C3%B5es-estruturais-e-de-desgaste.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

JONES, D. A. **Principles and prevention of corrosion**. 2 ed. Pearson. E.U.A. 1992.

MARQUES, D. A. Efeito do tratamento térmico nas propriedades eletroquímicas e comportamento de corrosão do aço inoxidável classe 410 em solução de cloreto. **Repositorio.ufc.br**, 2021.

PANOSSIAN, Z. **Manual corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo (Sp): Eletropaulo, 1993.

QUEIROZ, C. H. B. Estudo da influência do pH do eletrólito no comportamento eletroquímico das ligas UNS S41003 e ENDUR 300. **repositorio.ufc.br**, 2021.

SILVA; PAULO ROBERTO MEI. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.
LOTO, R. T.; LOTO, C. A. Corrosion behaviour of s43035 ferritic stainless steel in hot sulphate/chloride solution. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 7, n. 3, p. 231–239, 2018. ISSN 2238-7854. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785417301862>.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza: Biblioteca Universitária, 2013. Disponível em: <https://biblioteca.ufc.br/wp-content/uploads/2019/10/guia-de-citacao-06.10.2019.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2022.