

**EFEITO DO REVENIMENTO NA DUREZA E NO COMPORTAMENTO
ELETROQUÍMICO DO AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO ASTM
743 GRAU CA6NM**

¹Feitosa, A. G., Urbano, ¹J. V. S., ²Araújo, W.S., ^{1*}de Lima, H. M. L. F.

¹ Universidade Federal do Cariri - Engenharia de Materiais, Av. Tenente Raimundo Rocha, 1639, Cidade Universitária, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil.

² Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Av. Mister Hull, s/n, Pici Fortaleza, Ceará, Brasil

*Autor correspondente: hillane.lima@ufca.edu.br.

RESUMO

O aço inoxidável martensítico ASTM A743 grau CA6NM é uma liga baseada nos aços martensíticos tradicionais, com redução no teor de carbono, e pequenas adições de elementos de liga, como níquel e molibdênio. Este aço apresenta melhoria de tenacidade na estrutura martensítica e melhor resistência a corrosão, além de menor sensibilidade a trincas a frio e resistência a fragilização por revenido, em comparação aos aços comuns de sua classe. São empregados em ambientes onde há exigência de resistência mecânica e dureza associada a resistência a corrosão. O presente estudo avaliou o efeito do revenimento na dureza e no comportamento eletroquímico deste aço. As amostras foram submetidas a condições de revenido a 400, 500 e 600°C por 1 e 5 horas. A dureza foi avaliada através de medidas de microdureza Vickers e o comportamento eletroquímico foi analisado através da técnica de polarização potenciodinâmica em meio contendo 0,6 mol/L de NaCl.

Palavras – Chave: Aço inoxidável martensítico, Tratamento térmico, Corrosão.

ABSTRACT

The ASTM A743 grade CA6NM martensitic stainless steel is an alloy based on traditional martensitic steels, with reduced carbon content and small additions of alloying elements such as nickel and molybdenum. This steel offers improved toughness in the martensitic structure and better corrosion resistance, as well as lower sensitivity to cold cracking and resistance to tempering embrittlement compared to common steels of its class. It is used in environments where high mechanical strength and hardness are required alongside corrosion resistance. This study evaluated the effect of tempering on the hardness and electrochemical behavior of this steel. Samples were subjected to tempering conditions at 400, 500, and 600°C for 1 and 5

hours. Hardness was assessed using Vickers microhardness measurements, and electrochemical behavior was analyzed using the potentiodynamic polarization technique in a 0.6 mol/L NaCl solution.

Keywords: Martensitic stainless steel, Heat treatment, Corrosion.

INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas de Fe-Cr-C com concentrações entre 12% e 18% de cromo e maiores teores de carbono em comparação com outros aços inoxidáveis (1). O maior teor de carbono provoca uma melhoria nas propriedades mecânicas desses aços, como aumento de dureza e resistência ao desgaste, entretanto, apresentam uma menor resistência à corrosão quando comparados aos aços ferríticos e austeníticos. Na busca por redução dos defeitos durante a solidificação e processamento, bem como melhorias nas propriedades de resistência à corrosão desses aços, foram desenvolvidos na década de 60 os aços inoxidáveis martensíticos macios (2).

O aço inoxidável martensítico macio A743 grau CA-6NM possui menor teor de carbono e pequenas adições de níquel e molibdênio (3). São ligas empregadas em aplicações que requerem uma boa resistência mecânica associada a resistência à corrosão, principalmente em equipamento para extração de petróleo, rotores e componentes de turbinas hidráulicas (4) e (1). Os tratamentos térmicos empregados nesses aços são essenciais para obtenção das propriedades mecânicas desejadas, e o controle dos ciclos dos tratamentos térmicos também pode influenciar outras propriedades importantes como a resistência à corrosão dessas ligas (3) e (5) e (6).

Neste trabalho, as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão do aço inoxidável martensítico ASTM A743 grau CA6NM revenido a 400, 500 e 600°C por 1 e 5 horas foram investigadas através das curvas de polarização anódica, obtidas pela técnica de polarização potenciodinâmica linear em meio contendo 0,6 mol/L de NaCl e medidas de dureza Vickers. Foi observado um aumento significativo de dureza em amostras submetidas ao revenimento em um intervalo de tempo mais curto, em comparação ao tempo de tratamento mais longo. Notou-se também, um pico de endurecimento relativo a 600°C, independente do tempo de revenimento. Tal comportamento sugere um endurecimento secundário por precipitação de carbonetos em torno dessa temperatura para essa classe de aços.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo, foi utilizado o aço inoxidável martensítico fundido A743 grau CA6NM, cuja composição química é mostrada na tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável CA6NM estudado em %p.

	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	W	Cu	N	P
CA6NM	0,045	12,73	3,97	0,66	0,81	0,96	0,016	0,106	0,079	0,031

Fonte: fornecida pelo fabricante.

O material como recebido foi seccionado e as peças obtidas, foram submetidas ao tratamento térmico de têmpera a uma temperatura de 1050°C, com taxa aquecimento de 30°C/s e resfriamento em água. Em seguida, as amostras foram submetidas ao revenimento a 400, 500 e 600°C por tempos de 1 e 5 horas. Amostras na condição temperada foram utilizadas como referência.

As análises de dureza foram conduzidas em um microdurômetro com um carregamento de 1N e tempo de aplicação da carga de 10s. O comportamento eletroquímico foi estudado por meio da técnica de polarização potenciodinâmica linear utilizando uma velocidade de varredura de 1mV/s com aplicação de sobrepotenciais crescentes a partir do valor do potencial de circuito aberto até atingir o valor de 1mA para corrente. Uma célula eletroquímica de três eletrodos foi utilizada com: (I) Eletrodo de referência de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl), (II) Contra eletrodo de platina e (III) Eletrodo de trabalho (amostras em análise) imersos numa solução de 0,6 mol/L de NaCl. Antes de todas as medidas a superfície das amostras foi preparada com lixas d'água de 100, 200, 400 e 600 *mesh*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado com o intuito de verificar indiretamente alguma alteração microestrutural em decorrência do revenimento ao qual as amostras foram submetidas. As tabelas 2 e 3 apresentam os valores médios das medidas realizadas, bem como seus respectivos desvios padrão, para as amostras que foram mantidas na temperatura de revenimento por 1h (Tab. 2), e para aquelas que permaneceram na temperatura de revenimento durante 5h (Tab. 3).

Tabela 1 - Valores médios obtidos a partir das medidas de microdureza das peças revenidas por **1h**.

Temperatura	Dureza (HV)	Valor mínimo	Valor máximo	Desvio Padrão
Tempera	153,06	151,30	153,30	0,984
400°C	240,83	236,50	245,20	3,891
500°C	239,28	232,30	249,70	6,511
600°C	254,39	249,70	259,10	4,700

Fonte: Autora, 2024

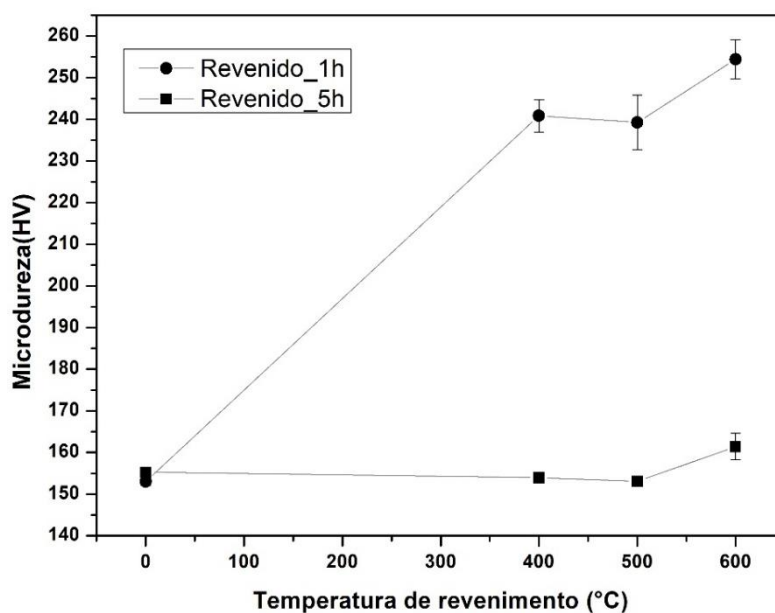
Tabela 2 - Valores médios obtidos a partir das medidas de microdureza das peças revenidas por **5h**.

Temperatura	Dureza (HV)	Valor mínimo	Valor máximo	Desvio Padrão
Temperada	155,26	153,50	155,70	0,984
400°C	153,94	153,50	155,70	0,984
500°C	153,06	151,30	153,50	0,984
600°C	161,38	153,50	165,20	3,175

Fonte: Autora, 2024

A partir dos valores médios de dureza foram obtidas as curvas de variação de dureza (HV) em função da temperatura de revenimento das amostras.

Figura 1 – Perfil de dureza das amostras revenidas por **1 e 5 horas**.



Fonte: Autora, 2024

É possível observar na figura 1, em princípio, uma diferença significativa nas curvas de dureza quanto ao tempo de permanência do aço nas referidas temperaturas de revenimento. As amostras que permaneceram por 1 hora nas temperaturas de 400, 500 e 600°C, apresentaram maiores valores de dureza, caracterizada por um pico expressivo a partir de 400°C. Com o aumento do tempo de revenimento para 5 horas, as amostras apresentaram um perfil de dureza sem picos significativos e com valores próximos ao observado na amostra temperada, além disso, menores valores de dureza quando comparado à condição de revenimento por 1 hora.

Os menores valores de dureza observados nas amostras revenidas por 5 horas quando comparados às amostras revenidas por 1 hora, pode estar associado ao aumento do tamanho do grão austenítico com o aumento do tempo do tratamento térmico. Como fora também observado por Puosso⁷ (2022) que ao variar diferentes tempos de tratamento térmico em amostras de aços inoxidáveis martensíticos, observou um pico de dureza máximo quando mantido a temperatura do tratamento em torno de 2 horas, seguido por uma tendência a redução e em seguida estabilização da dureza à medida que se avaliou tempos mais longos (7).

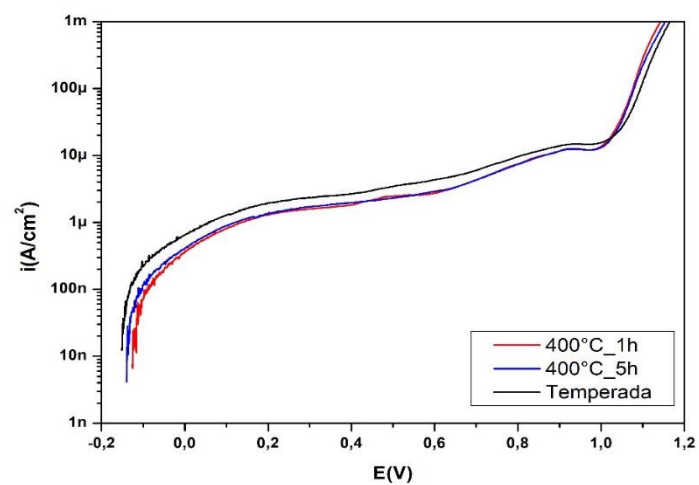
Em conformidade com o exposto, Tabatabae⁸, et al (2011), analisou tempos de revenimento superiores a 2h para um aço inoxidável martensítico CA6NM fundido e estabeleceu uma relação com a variável dureza, concluindo que o intervalo de tempo não é notavelmente eficaz para essa classe de aços, uma vez que o autor não observou mudanças significativas na dureza em função de tempos de revenimento superiores a 2h (8).

Além do efeito do tempo, é possível analisar o efeito da temperatura de revenimento das amostras. Para ambas as condições de tempo de revenimento estudadas (1 e 5 horas), entre o intervalo de temperaturas na faixa de 400°C a 500°C, observa-se uma pequena redução nos valores de dureza, com um subsequente aumento e um máximo relativo, em torno de 600°C. Podendo ser atribuído ao fenômeno de endurecimento secundário, no qual carbonetos metálicos precipitam durante o revenimento, conferindo aumento de dureza e resistência mecânica ao aço (9). Tabatabae⁸, et al (2011), em suas análises obtém resultados que corroboram com a hipótese de endurecimento secundário a 600°C nessa classe de aços, ao apresentar por meio de micrografias e difração de raios x precipitação de carbonetos de cromo em amostras revenidas a 600°C de aço inoxidável martensítico da classe CA6NM.

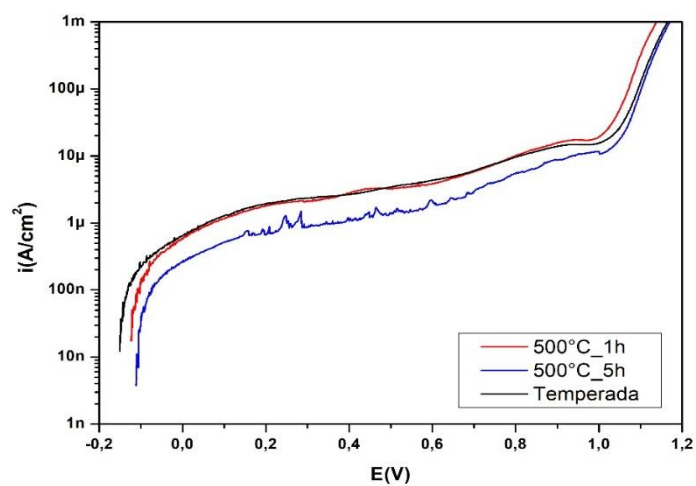
Aços inoxidáveis martensíticos macios, podem formar uma austenita altamente dispersa na martensita temperada, como resultado da segregação, quando essas ligas são revenidas acima de 773K (aproximadamente 500°C). Tal condição decorre da presença de 3,5% ou mais de Ni em sua composição, contribuindo para sua boa combinação de resistência e tenacidade (7). A excelente tenacidade atribuída ao Al martensítico macio é obtida a partir de tratamentos de revenimento em temperaturas próximas a 600°C. Quando a temperatura passa de 615°C a austenita estável decresce, sendo praticamente dissolvida novamente em austenita instável e novamente fica susceptível a transformação martensítica (5).

A figura 2 mostra as curvas de polarização anódica em 0,6 mol/L de NaCl, para as amostras nas diferentes temperaturas 400°C, 500°C e 600°C, variando os tempos de revenimento em 1h e 5h.

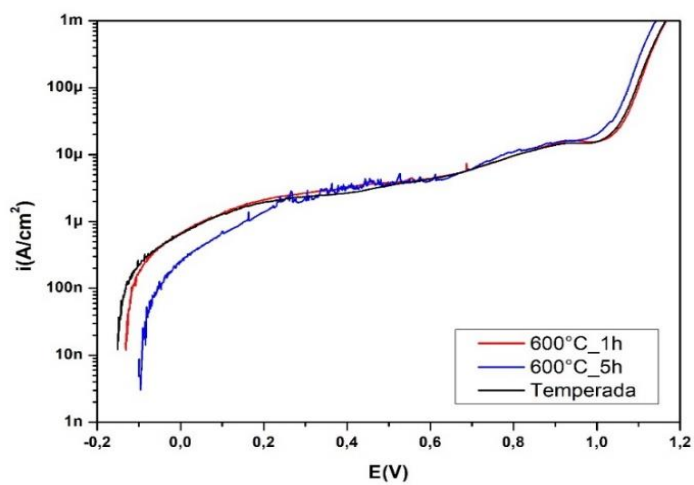
Figura 2 - Curvas de polarização anódica (a) Peças revenidas a 400°C;
(b) Peças revenidas a 500°C; (c) Peças revenidas a 600°C.



(a)



(b)



(c)

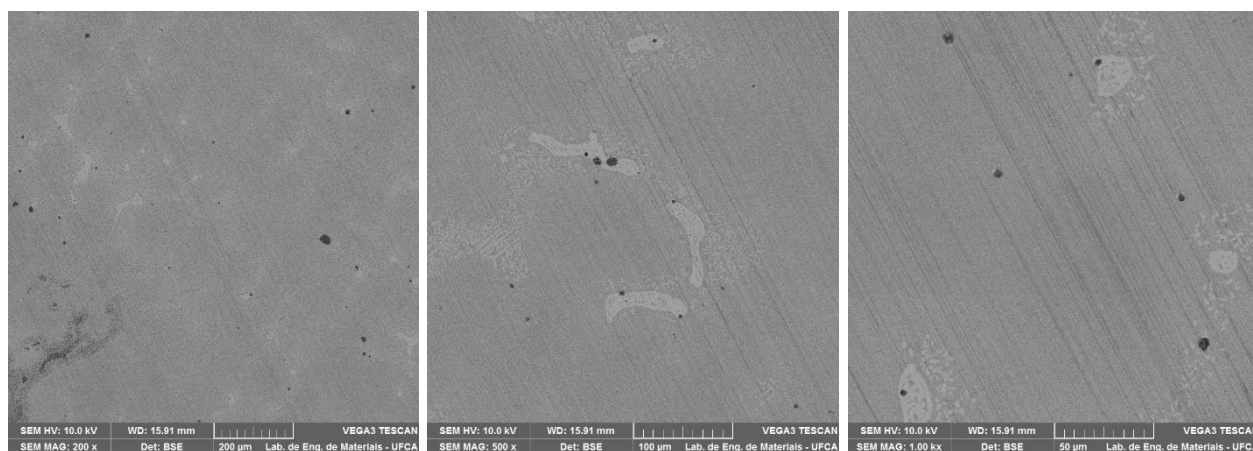
Fonte: Autora, 2024

A 400°C (Figura 2a), ambas as amostras apresentam comportamento semelhante: uma ampla faixa passivação e um aumento brusco de corrente em potenciais elevados. O aumento abrupto de corrente por volta de 1,0 V caracteriza a evolução de oxigênio na superfície das amostras, provocando a quebra do filme passivo. O revenimento por 1 e 5 horas deslocou a curva para valores de potenciais de corrosão mais positivos, além disso, as densidades de corrente na região passiva são menores para essas amostras em relação à amostra temperada, indicando um efeito benéfico do tratamento térmico nessas condições.

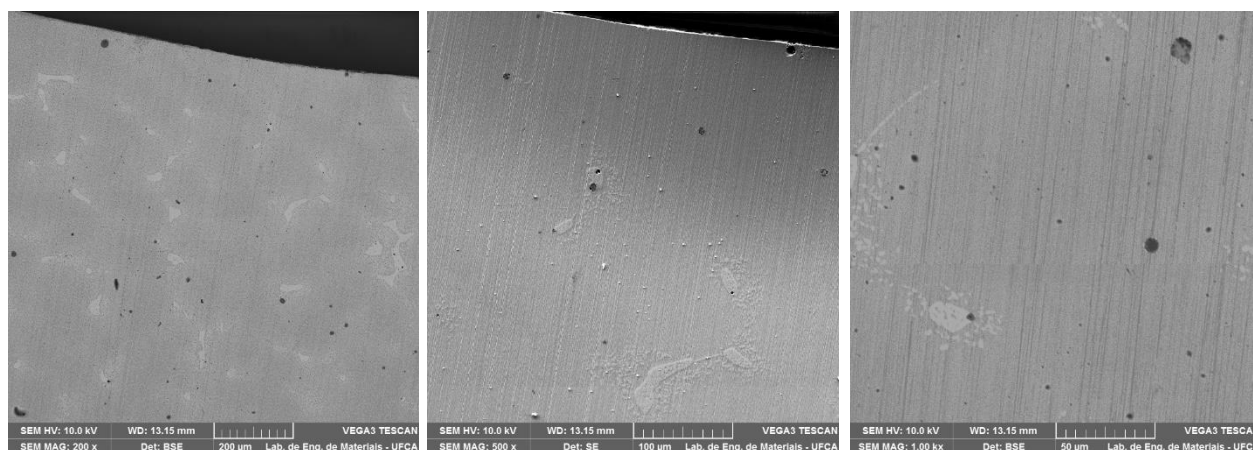
A 500°C e 600°C (Figuras 2b e 2c), as amostras temperada e revenida por 1 hora apresentaram comportamento semelhante e potenciais de corrosão mais negativos em relação a amostra revenida por 5 horas. Já a amostra envelhecida por 5h apresentou menores densidades de corrente crítica e passiva, porém a curva é instável em ambas as temperaturas e pequenos picos de corrente ao longo da região passiva podem ser observados. Esses picos indicam a nucleação de pites metaestáveis que não se desenvolveram devido a recuperação do filme passivo com o aumento do potencial de varredura. Esse resultado mostra o efeito negativo do revenimento a 500 e 600 °C por 5 horas na estabilidade e como consequência na qualidade do filme passivo.

Após os ensaios eletroquímicos, foi realizada a caracterização da superfície das amostras pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As imagens são mostradas nas figuras 3 e 4. Nas amostras revenidas por 1 hora, é possível observar uma maior degradação da superfície com o aumento da temperatura de revenimento. Com o aumento do tempo de revenimento a mesma tendência é verificada, além disso, também é possível observar uma maior degradação superficial comparada as amostras revenidas por 1 hora.

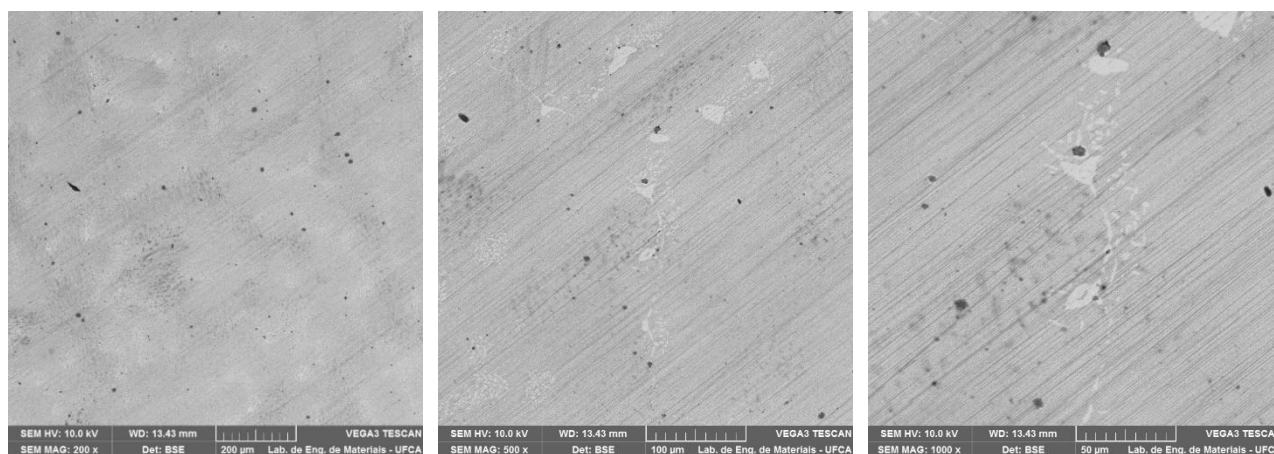
Figura 3 - Amostras revenidas por 1h: (a) 400°C; (b) 500°C; (c) 600°C. Aumentos respectivamente de 200x, 500x, 1000x



(a)



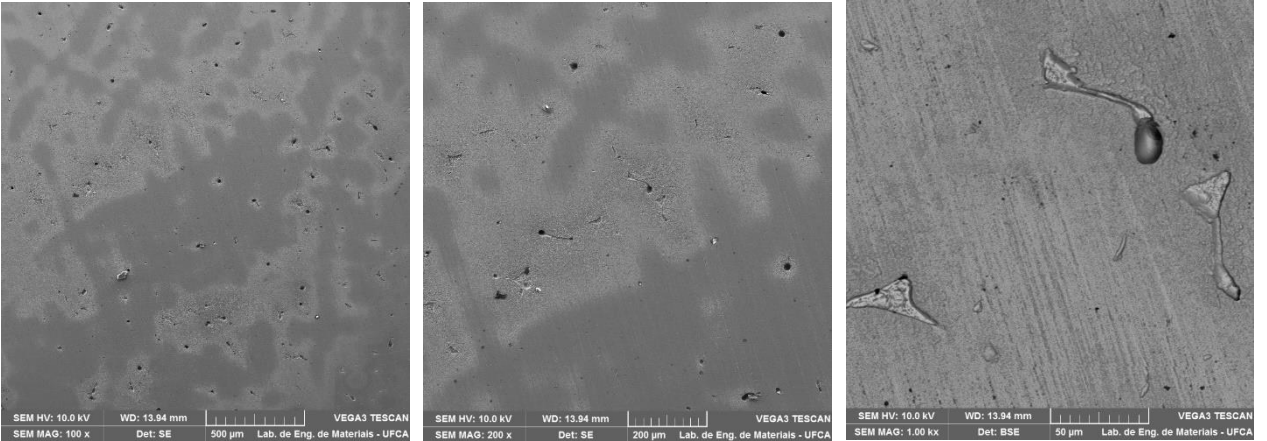
(b)



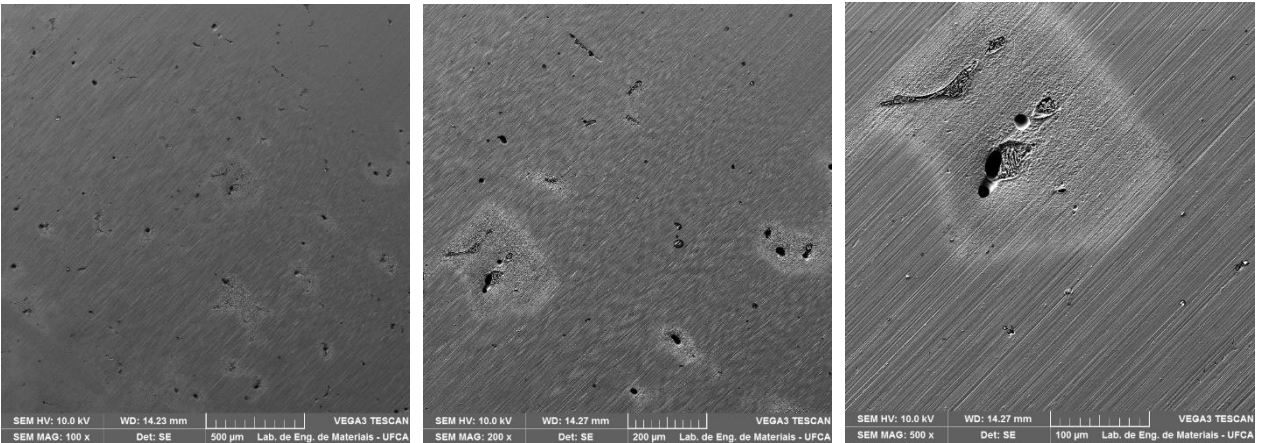
(c)

Fonte: Autora, 2024

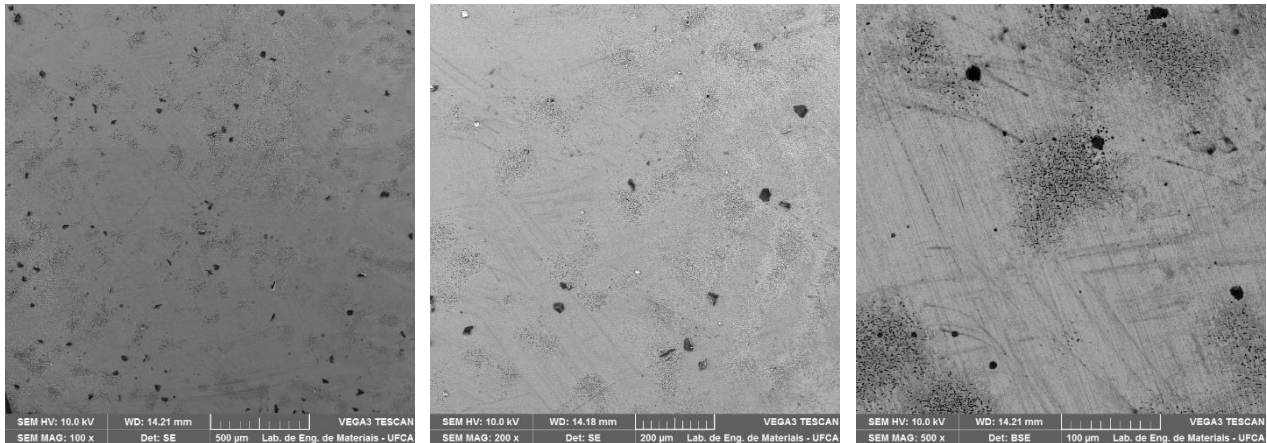
Figura 4 - Amostras revenidas por 5h: (a) 100°C; (b) 200°C; (c) 500°C. Aumentos respectivamente de 200x, 500x, 1000x



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autora, 2024

CONCLUSÃO

- As amostras revenidas por 5 horas nas temperaturas de 400, 500 e 600°C, apresentaram menores valores de dureza;
- Os maiores valores de dureza observados para as amostras revenidas a 600°C por 1 hora pode ser atribuído ao fenômeno do endurecimento secundário;
- As curvas de polarização das amostras revenidas a 400°C por 1 e 5 horas mostraram um efeito benéfico do tratamento térmico no comportamento eletroquímico do aço estudado;
- O revenimento a 500 e 600 °C por 5 horas teve um efeito negativo na estabilidade e qualidade do filme passivo formado na superfície do material.
- A caracterização da superfície das amostras após o ensaio de polarização mostrou um aumento da degradação superficial das amostras com o aumento da temperatura e do tempo de revenimento.

REFERÊNCIAS

- 1 TOTTEN, G. E. **Steel heat treatment: Metallurgy and technologies**. 2. ed. Boca Raton, FL, Taylor & Francis Group, 2006.
- 2 HENKE, S. L. **Desenvolvimento de procedimento de soldagem do aço inoxidável martensítico tipo CA6NM sem tratamento térmico posterior**. 1998. Universidade de Santa Catarina, 1998.
- 3 MARTINS, D. D. do N. **Caracterização do comportamento eletroquímico do aço ASTM A743 CA6NM após soldagem GMAW com metal de adição AWS 5.22 EC410NIMO**. 2018. Universidade de Brasília, 2018.
- 4 STROBEL FILHO, E., LIMA, A. P. de, MARIANO, N. A. "Efeito do tratamento térmico na caracterização microestrutural e das propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico do tipo 13Cr5Ni0,02C", Rem: Revista Escola de Minas, v. 60, n. 1, p. 123–127.
- 5 PAREDES, R. S. C. "Aços inoxidáveis: metalurgia e soldabilidade", v. 55, n. 41, p. 136, 2020.
- 6 FRANKEL, G. S. "Pitting Corrosion of Metals: A Review of the Critical Factors", **Journal of The Electrochemical Society**, v. 145, n. 6, p. 2186–2198, 1998. DOI: 10.1149/1.1838615.

- 7 PUOSSO, F. C. **Estudo experimental e por meio de simulação computacional do tratamento térmico de têmpera para o aço inoxidável X22CrMoV12-1**. 2022. Universidade Federal de São Carlos, 2022.
- 8 TABATABAE, B. A., ASHRAFIZADEH, F., HASSANLI, A. M. Influence of retained austenite on the mechanical properties of low carbon martensitic stainless steel castings. *ISIJ International*, v.51, p.471-475, 2011
- 9 COSTA E SILVA, A. L. V., MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo, Editora Blucher, 2010.