

MICROESTRUTURA E DUREZA DO AÇO S41003 QUANDO SUBMETIDO A DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS

Renata Rodrigues Alves

José Lucio Gonçalves Junior

Universidade Federal de Goiás

renata_rodrigues@ufg.br

jlucio@ufg.br

Daniel Fernandes Cunha

Universidade Federal de Goiás

danielcunha@ufg.br

Kléber Mendes de Figueiredo

Universidade Federal de Goiás

kleberfig@ufg.br

Geraldo Lucio De Faria

Universidade Federal de Ouro Preto

geraldofaria@ufop.edu.br

Wiliam da Silva Labiapari

Aperam South America

wilian.lapiapari@aperam.com

Resumo: O aço inoxidável é conhecido pela sua resistência à corrosão e à oxidação a elevadas temperaturas. Todavia, aços inoxidáveis ferríticos apresentam baixa dureza e, teoricamente não podem ser completamente austenitizados, portanto, não endurecem por tratamento de térmico. Apesar do aço inoxidável ferrítico 410D (S41003) possuir composição química relativamente simples, com apenas 0,015% em peso de carbono, estudos prévios indicam que esta liga pode ser totalmente ou parcialmente endurecida com tratamento térmico. Portanto, o presente trabalho visa analisar o efeito de diferentes condições de tratamento térmico na microestrutura e endurecimento do material. Como metodologia foram realizadas duas condições de tratamento térmico, na primeira condição as amostras foram aquecidas a 1000 °C, variando o tempo de austenitização em 5 min, 30 min, 60 min, 120 min e 240 min, em seguida temperadas em água. Já para a segunda condição as amostras passaram por um recozimento intercrítico, a 800 °C por 1h e resfriadas no forno, logo depois as amostras foram aquecidas a 1000 °C, variando o tempo de austenitização em 5 min, 30 min, 60 min, 120 min e 240 min e temperadas em água. A análise microestrutural indicou que o material, como recebido, possui uma estrutura ferrítica poligonal com precipitação de carboneto do tipo $Cr_{23}C_6$, e o tratamento de recozimento intercrítico gerou a precipitação de mais carboneto de cromo. Após o tratamento de têmpera a análise qualitativa corroborou com a estudos prévios que indicam um aumento das ripas de martensita, isso devido ao aumento do tamanho de grão. Os resultados de endurecimento apontam que a liga pode ser endurecida por têmpera, porém quando o material passa por um processo de recozimento intercrítico prévio a dureza aumenta. Além do mais, quanto mais tempo as amostras são mantidas na temperatura de austenitização menor a dureza pós têmpera, tal fenômeno está associado ao aumento do tamanho de grão austenítico.

Palavras-chave: Aço inoxidável. Caracterização microestrutural. Dureza. Tamanho de grão. Carboneto de cromo.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas de ferro-cromo-carbono, com Cr na faixa de 12 a 30% em peso, e um teor de C menor que 0,1% em peso. Possuem fase ferrita α e uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Oferecem boa resistência à corrosão, são magnéticos e seu comportamento mecânico é similar ao do aço carbono (Chiaverini, 2002; Modenesi, 2001).

Além da composição básica de Fe-Cr, outros elementos são adicionados aos aços inoxidáveis, visando interferir nas propriedades mecânicas e microestrutura do material. Em relação a microestrutura, os elementos de liga que são adicionados influenciam não somente às alterações nas fases ou constituintes em equilíbrio, mas também na maneira e velocidades como as fases se formam. Os elementos que estabilizam a austenita, por exemplo, tendem a diminuir a temperatura de transformação da fase austenita γ para fase ferrita α e aumentar a temperatura da austenita γ para a fase

ferrita σ . O níquel e o manganês são elementos que, quando adicionados em alta concentração, têm papel de estabilizador da austenita (Silva e Mei, 2010). Por outro lado, o cromo, molibdênio e nióbio, tem o papel de estabilizar a ferrita, que diminuem a faixa onde a austenita existe (Boniardi e Casaroli, 2014).

Teoricamente, os aços inoxidáveis ferríticos não podem ser completamente austenitizados e, portanto, não endurecem por tratamento de térmico. Entretanto, há exceções como o aço inoxidável ferrítico 410D, que devido ao baixo teor de cromo e outros elementos estabilizadores de ferrita pode ser endurecido totalmente ou parcialmente por meio de um tratamento térmico adequado (Sundqvist et al., 2018; Arruda et al., 2018; Vilela et al., 2019). Quando endurecido parcialmente, a temperatura intercrítica, o material forma uma estrutura bifásica, composta por ferrita e martensita. A martensita é uma fase mais dura e resistente, por outro lado a ferrita é macia, gerando uma combinação de propriedades que pode ser favorável a depender da situação (Nunes, 2019).

O aço inoxidável ferrítico 410D, também conhecido como UNS S41003 ou 3Cr12, possui aplicação estrutural e de desgaste. A liga contém baixo teor de carbono com adições de cromo e níquel, sendo utilizada em ambientes que requerem resistência a corrosão e abrasão. Devido a composição química relativamente simples o material se torna mais barato que outros aços especiais, e uma opção para substituição de materiais utilizados em aplicações estruturais, como o aço carbono. Na condição recozido, o material apresenta dureza de 147 HV (Aperam, 2022).

A liga 410D é susceptível a precipitação de carboneto de cromo, $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$, após seu processo de fabricação, com tamanho médio de 500 nm e geralmente agrupados em banda ao longo da direção de laminação (Bettanini et al., 2019). Para a liga com 0,014% em peso de C e 11,06% em peso de Cr, estudada pelos pesquisadores Moura et al. (2022), após laminado a quente o material apresentou um grão ferrítico de $(22,1 \pm 2,6) \mu\text{m}$ com $(0,005 \pm 0,001) \%$ de área de $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$. O mesmo material, após recozido a 795 °C por 5 h, apresentou um grão ferrítico de $(23 \pm 3) \mu\text{m}$ com $(0,05 \pm 0,001) \%$ de área de $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$, ou seja, apesar do tamanho de grão não variar significativamente com o recozimento, a fração de carboneto aumentou.

Faria et al. (2020) em seu trabalho com a liga 410D, contendo 0,013% e 11,097% em peso de carbono e cromo respectivamente, investigou o desenvolvimento da microestrutura e propriedades mecânicas quando submetida as temperaturas intercríticas de 825 °C e 850 °C, por diferentes tempos, e temperadas em água. Os resultados indicaram que com aumento do tempo e temperatura a fração volumétrica de martensita aumenta com queda na precipitação de carboneto de cromo. Observações experimentais apontam a influência da dissolução do Cr_{23}C_6 , homogeneização do cromo e da presença de carbono em solução sólida na cinética da austenitização e, conseqüentemente, transformação em martensita após processo de têmpera (Alvarez et al., 2021 e Bettanini et al., 2019).

Outro fator conhecido que influencia na transformação da martensita é o tamanho de grão da austenita. O contorno de grão fornece um ambiente favorável para o início da nucleação da martensita, contudo o tamanho do grão tem um efeito estabilizador limitando no volume de martensita (Guimarães e Rios, 2010).

Estudos prévios têm discutido a influência da temperatura e tempo na microestrutura e resistência do aço 410D após processo de têmpera. Entretanto, detalhes da comparação do processo de têmpera com prévio recozimento intercrítico ainda não foi investigado. Os resultados obtidos neste estudo permitem um melhor controle das propriedades do material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O material estudado é o aço inoxidável ferrítico 410D, laminado a quente e recozido, produzido pela empresa Aperam South America. A composição química do aço está apresentada na Tabela 1. O Carbono e Silício foram analisados pela técnica de absorção de infravermelho no equipamento do fabricante Leco, modelo CS4440, já o teor Nitrogênio foi avaliado pela técnica de termocondutividade no equipamento do fabricante Leco, modelo TC4360. Os demais elementos químicos foram analisados pela técnica de espectrometria de fluorescência de raios-x no equipamento do fabricante ThermoARL, modelo 9900.

Tabela 1. Composição química do 410D (% em peso).

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
Resultado Obtido	0,0150	0,58	0,50	0,028	0,0008	11,16	0,34

De acordo com a norma ASTM A276 (2013) o aço 410D é classificado como ASTM S41003. Para identificar as temperaturas de transformação de fase e precipitados presentes no material foi realizada uma simulação computacional com o programa computacional Matcalc, banco de dados mc-fe-v2.060, baseado na composição química do aço.

O diagrama de fases em equilíbrio, Figura 1, indica que a temperatura inicial de austenitização $A_{c1} = 778 \text{ °C}$ e temperatura final de austenitização $A_{c3} = 843 \text{ °C}$.

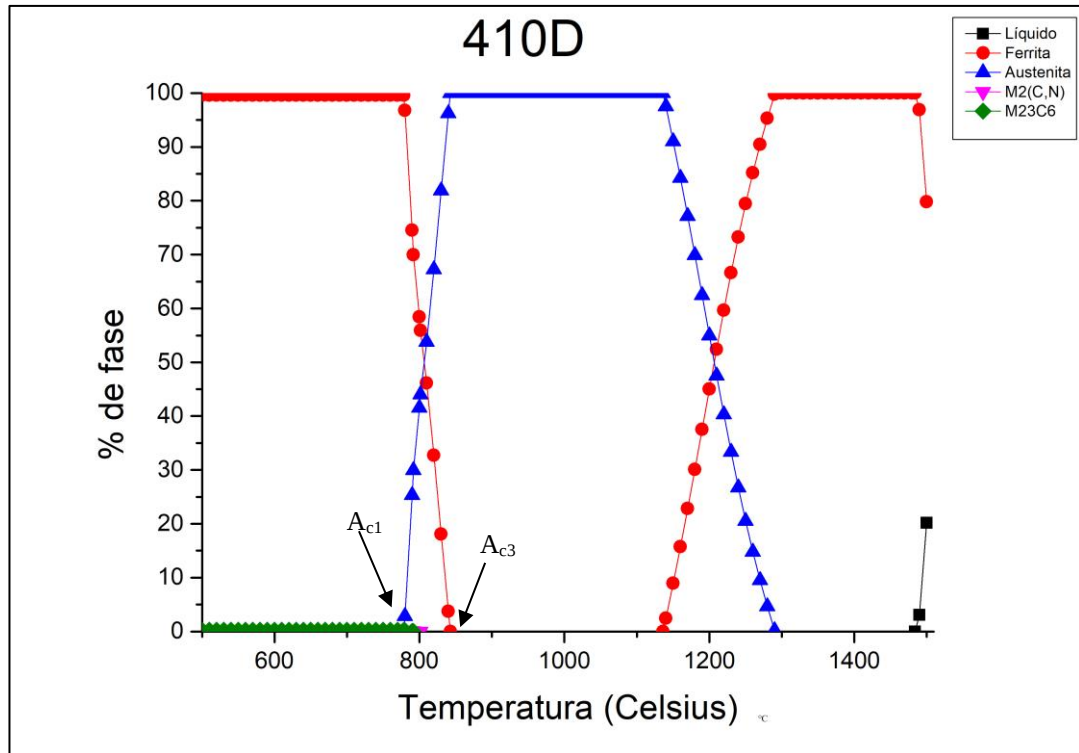


Figura 1: Resultado da simulação computacional para o diagrama de fases do aço 410D.

2.2. Procedimentos Experimentais

As amostras de aço inoxidável 410D possuem espessura de 5,4 mm e dimensões de 25,3 x 20,8 mm. Foram realizadas duas condições de tratamento térmico, a primeira condição consistiu no processo de têmpera, com material aquecido continuamente até 1000 °C, região onde está completamente austenitizado, e em seguida resfriado em água. O tempo de austenitização da peça variou como mostrado na Figura 2. Já na segunda condição houve um recozimento intercrítico prévio a têmpera, à 800 °C por 1 hora seguido de um resfriamento lento dentro do forno.

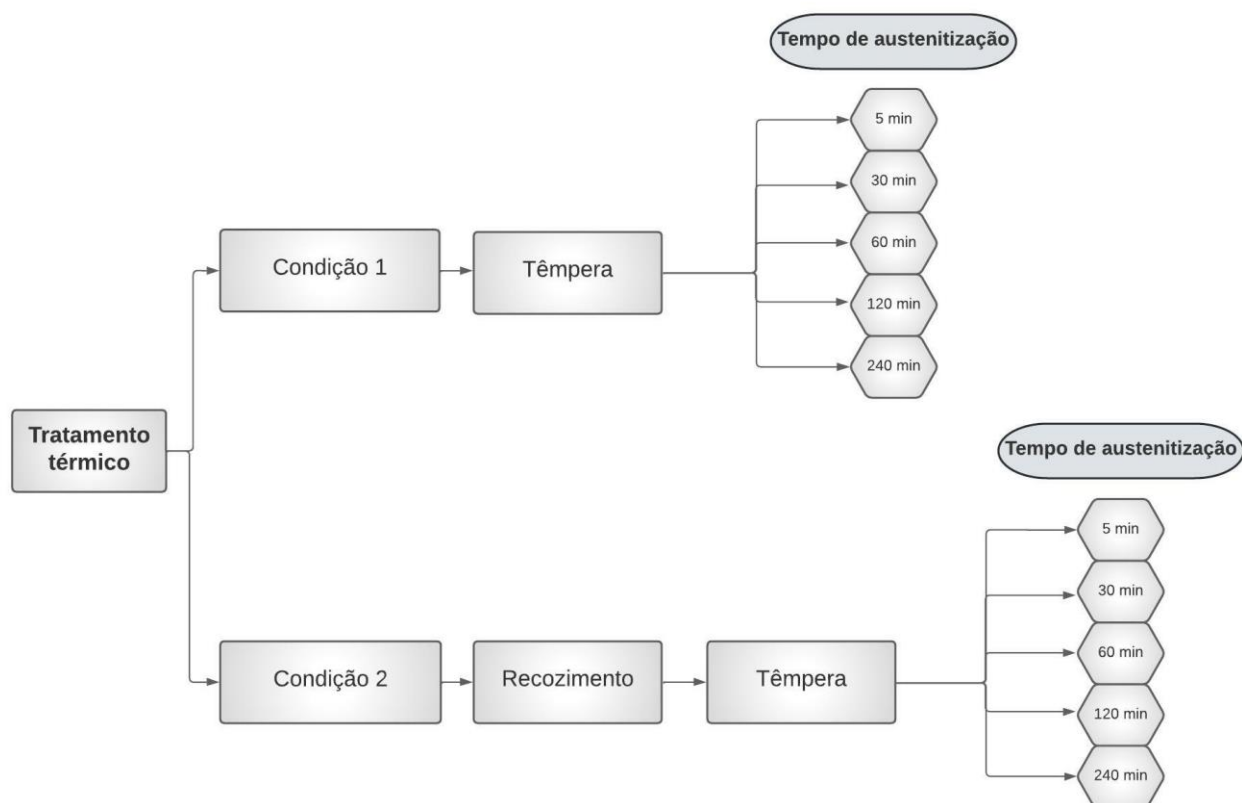


Figura 2. Esquema do procedimento experimental.

2.3. Ensaios de Dureza

O ensaio de dureza Vickers sucedeu de acordo com a norma ASTM E 92-82 (2013), em um durômetro da marca Mitutoyo, modelo HM-100. Foram realizadas 10 identações, com uma carga de 10 kgf em um tempo de 10 s.

2.4. Caracterização Microestrutural

As amostras, como recebida e após os tratamentos térmicos, foram preparadas metalograficamente com lixa d'água de granulometria de 220, 320, 400, 500, 600 e 2000; em seguida foram polidas com alumina em suspensão de granulometria de 1 μm e 0,5 μm . Para o ataque químico, o reagente utilizado foi selecionado de acordo com a norma ASTM E407 – 07 (2015), sendo utilizado a solução 81 (vilella) com a composição química de apresentada na Tabela 2. Para as análises microscópicas foi utilizado o microscópio óptico de marca ZEISS, modelo AXIO imager M2m e o microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo JSM IT300LV, utilizando Feixe eletrônico por filamento de tungstênio.

Tabela 2. Ataque químico utilizado de acordo com norma ASTM E407-07(2015).

Composição do Villela	Método de aplicação	Tempo de ataque
1 g ácido pícrico 100 mL etanol (95%) 5 mL HCL	Imersão	40s

A fim de avaliar a concentração de cromo nas amostras, como recebida e após termicamente tratadas, obteve-se mapas de composição, obtidos por Microanalisadores de sonda eletrônica (EPMA - Electron Probe Microanalyzers). As amostras foram analisadas em uma microsonda eletrônica JEOL JXA-8230, com os cristais TAP, PET/L-H e LIF-L/H. As análises foram feitas com tensão de aceleração de 15 kV e 500 nA de corrente.

2.5. Análise de tamanho de grão

Para revelar o contorno de grão várias tentativas com diferentes reagentes foram realizadas, a composição que mostrou melhor resultado está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Ataque químico utilizado para revelar o contorno de grão.

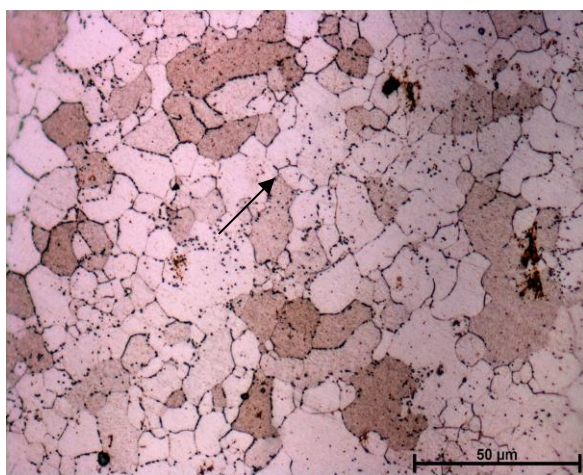
Composição	Método de aplicação	Tempo de ataque
• 15 ml detergente lava louças • 20 ml Nital 5% (5 ml HNO₃ + 95 Álcool Etílico) • 60 ml Vilella	Imersão	45s

O tamanho do grão foi calculado usando o programa computacional ImageJ, com seleção aleatória de 40 grãos em cada amostra para cálculo da média aritmética e desvio padrão.

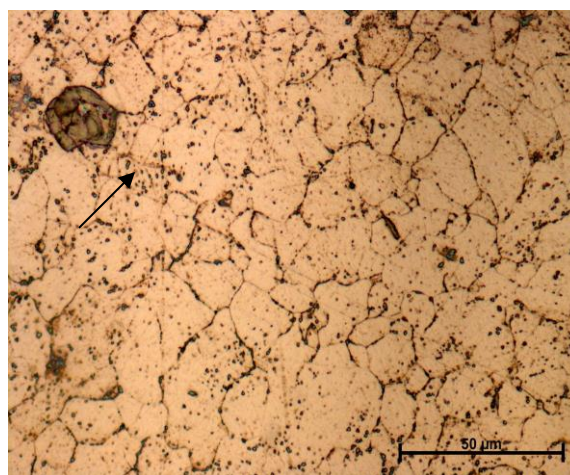
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Efeito do recozimento na microestrutura

A microestrutura do aço 410D no seu como recebida e após recozido está apresentado na Figura 3. Pode-se perceber a presença de grãos de ferrita poligonais, com de tamanho do grão no como recebida de $(26 \pm 6) \mu\text{m}$ e após recozida de $(23 \pm 6) \mu\text{m}$. Assim como evidenciado pelo trabalho de Bettanini et al. (2019), os carbonetos aparecem em bandas na direção da laminação dentro da matriz ferrita.



A) Amostra no seu como recebida.



B) Amostra após recozida a 800 °C.

Figura 3. Micrografias mostrando carbonetos $M_{23}C_6$ distribuídos dentro da matriz de ferrita ao longo de bandas na direção de laminação, indicada pela seta.

Como mostrado no diagrama de equilíbrio, Figura 1, o aço 410D apresenta carbonetos do tipo $M_{23}C_6$ até a temperatura de cerca de 800 °C. A micrografia da amostra como recebida, Figura 4, apresenta a estrutura esferoidizada dos precipitados, preferencialmente no contorno de grão, por ser uma região de maior acúmulo energético.

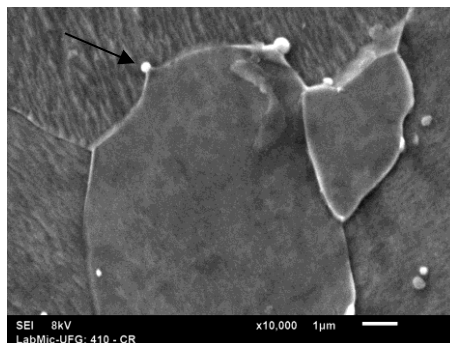
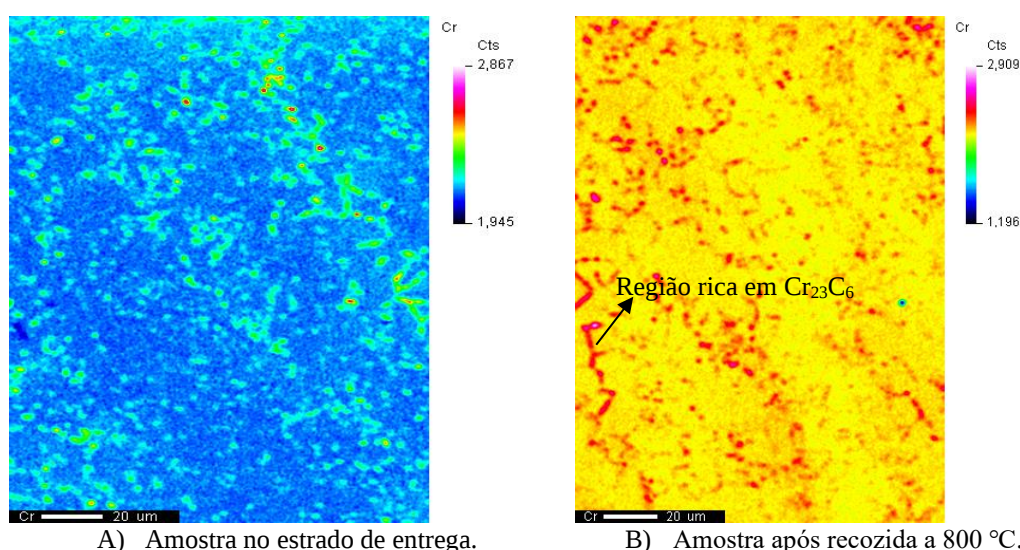


Figura 4. Microestrutura observada do aço 410D como recebido, carboneto indicado por seta.

O carbono é um elemento intersticial que possui baixa solubilidade no $\text{Fe } \alpha$ e quando ligado ao cromo forma o precipitado Cr_{23}C_6 , gerando regiões pobres em cromo a sua volta (Serna-Giraldo, 2007), logo, a fim de investigar a distribuição dos carbonetos do tipo Cr_{23}C_6 foram obtidos os mapas de concentração de cromo, Figura 5.



A) Amostra no estrado de entrega.

B) Amostra após recozida a 800 °C.

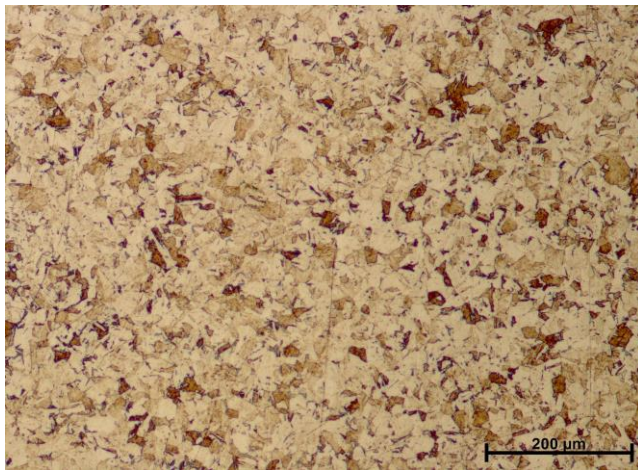
Figura 5. Mapas de concentração de cromo na amostra do aço 410D antes e depois de recozido a 800 °C.

A escala de cor do mapa indica que a amostra recozida a 800 °C, Figura 5 (B), apresenta mais regiões enriquecidas de cromo, devido a precipitação de Cr_{23}C_6 , comparando com a amostra como recebida, Figura 5 (A). Resultado alinhado ao encontrado no estudo de Moura et al. 2022, sugerindo maior fração de carboneto de cromo na amostra recozida.

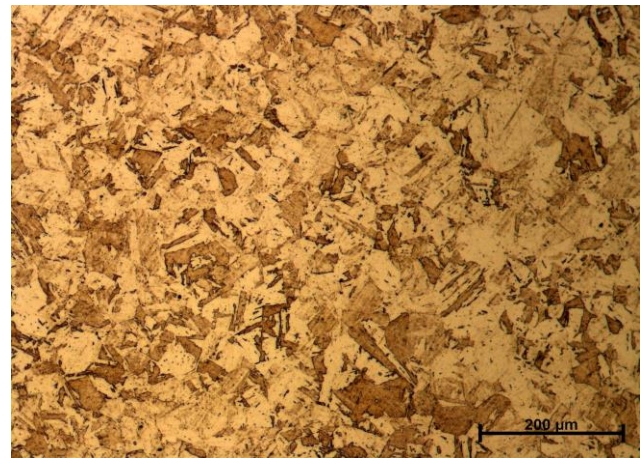
3.2. Efeito do tempo de austenitização na microestrutura

A micrografia das amostras na condição 1 e das amostras na condição 2, apresentam resultados e discussões semelhantes. Portanto, nesta seção será apresentado as imagens da condição 1, e a discussão quanto a evolução da microestrutura pode ser estendida para condição 2.

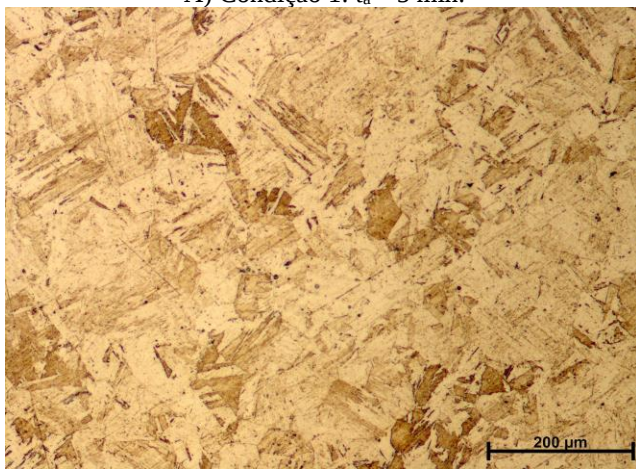
Observando o diagrama de equilíbrio percebe-se que a 1000 °C o aço 410D está completamente austenitizado, portanto ocorrendo a formação de martensita após a têmpera, Figura 6. Com o aumento do tempo de austenitização a fase martensita torna-se mais perceptível, como é possível observar na Figura 6 (A), (B), (C), (D) e (E).



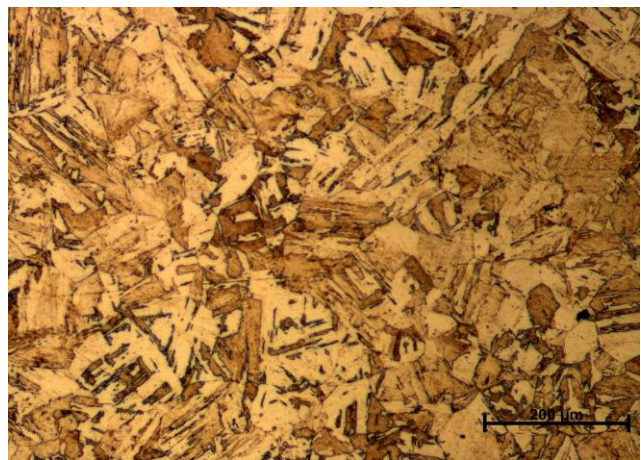
A) Condição 1: $t_a = 5$ min.



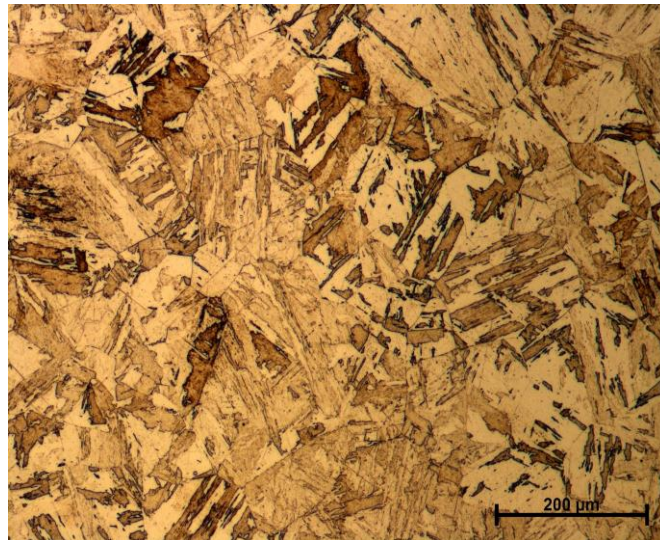
B) Condição 1: $t_a = 30$ min.



C) Condição 1: $t_a = 60$ min.



D) Condição 1: $t_a = 120$ min.



E) Condição 1: $t_a = 240$ min.

Figura 6. Microestrutura do material após tratamento térmico da condição 1, aquecido a 1000 °C e temperado em água, para cada tempo de austenitização (t_a).

A análise da Figura 6 aponta para um aumento da espessura da martensita com aumento do tempo de austenitização, fenômeno associado ao aumento do grão austenítico prévio. O tamanho do grão austenítico prévio limita o tamanho da martensita, para grãos pequenos as ripas colidem e param de crescer mais cedo e, portanto, tornam-se mais finas e mais curtas (BACK; SURREDDI, 2019). Verdire et al. (2020) também concluíram que com aumento do tempo de

austenitização ocorre um aumento significativo do tamanho de grão, e por consequência a ripa de martensita se torna mais maiores e mais largas devido aumento do bloco.

No processo de têmpera, com tempo de austenitização a 5 min não foi possível observar a microestrutura por microscopia óptica, Figura 6(A), tornando-se necessário a utilização de microscopia eletrônica de varredura para identificar a fase martensítica, Figura 7.

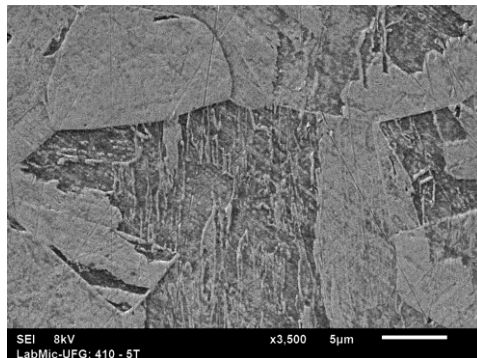


Figura 7. Microestrutura após tratamento térmico da condição 1, aquecido a 1000 °C por 5 min (A) e 240 min (B), seguido de têmpera em água.

Além disso, apesar do diagrama de equilíbrio indicar que a 1000 °C os carbonetos estariam completamente austenitizados, este processo é relativamente lento e foi observado uma dissolução gradual dos carbonetos com aumento do tempo de austenitização, assim como identificado na Figura 8.

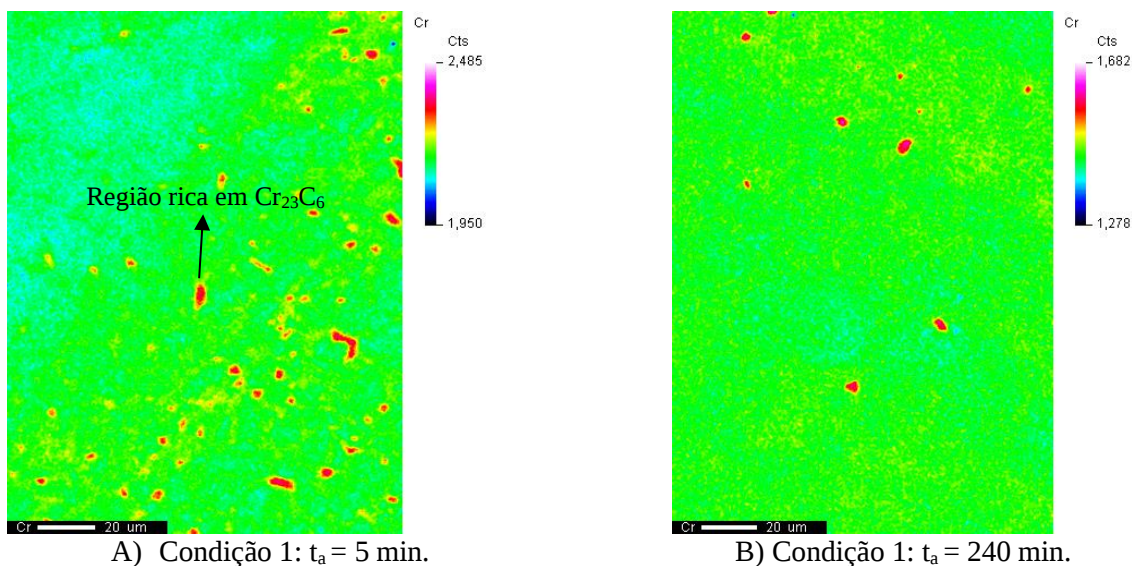


Figura 8. Mapas de concentração de cromo, obtidos por microanalisadores de sonda eletrônica, em amostras do aço 410D aquecidos a 1000 °C por 5 min (A) e 240 min (B), e temperados em água.

3.3. Efeito do tempo de austenitização na dureza e tamanho de grão

Tanto as amostras da condição 1 quanto da condição 2 foram endurecidas pelo tratamento térmico de têmpera, como apresentado na Figura 9. Entretanto, as amostras que passaram por recozimento intercrítico prévio a têmpera, condição 2, apresentaram dureza superior as amostras apenas temperadas, condição 1.

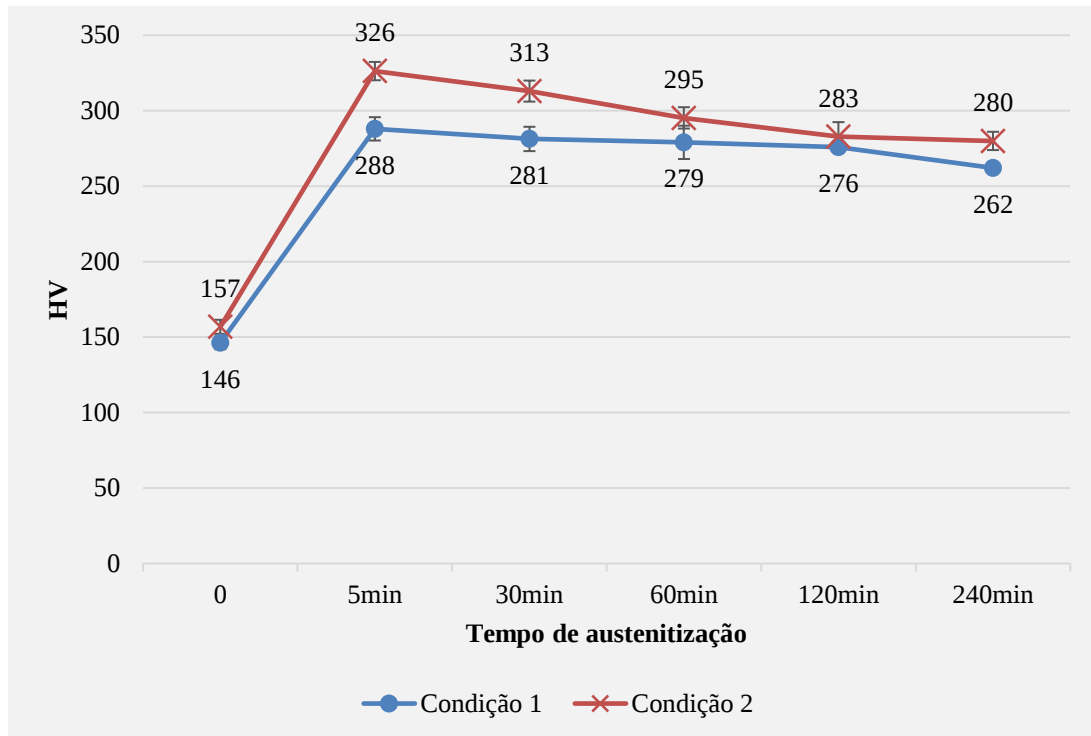


Figura 9. Resultado do ensaio de dureza Vickers do aço 410D, ensaiada com uma carga de 10 Kgf por 10 s.

A elevação da dureza devido ao recozimento intercrítico pode ser justificada pelo aumento da fração de Cr_{23}C_6 , como indicado no mapa da Figura 5, o carboneto de cromo é uma nanopartícula podendo servir como obstáculo ao movimento de discordância e evitar o deslizamento dos contornos de grão, endurecendo o material (Shackelford, 2008; Askeland e Phulé, 2013). Outro fato interessante é que com aumento do tempo de austenitização a diferença de dureza entre a condição 1 e 2 diminui, contribuindo com a hipótese de influência do carboneto, visto que este se dissolve com aumento do tempo de austenitização.

No ensaio de dureza, de ambas as condições, também é possível observar uma queda na dureza com o aumento do tempo austenitização. A provável justificativa se baseia no aumento do grão austenítico prévio, Figura 10. O aumento do tamanho de grão está associado a diminuição do contorno de grão. O contorno de grão atua como uma barreira ao movimento de discordância, pois dois grãos tendem a ter orientações cristalográficas diferentes dificultando esse movimento, além disso, na região do contorno de grão é comum ocorrer uma falta de ordem atômica, resultando em uma descontinuidade dos planos de escorregamento. Portanto, um material de granulometria fina (com grãos menores), possui uma área total de contorno de grãos maior, dificultando o movimento de discordâncias e logo proporcionando maior dureza ao material (Callister, 2016).

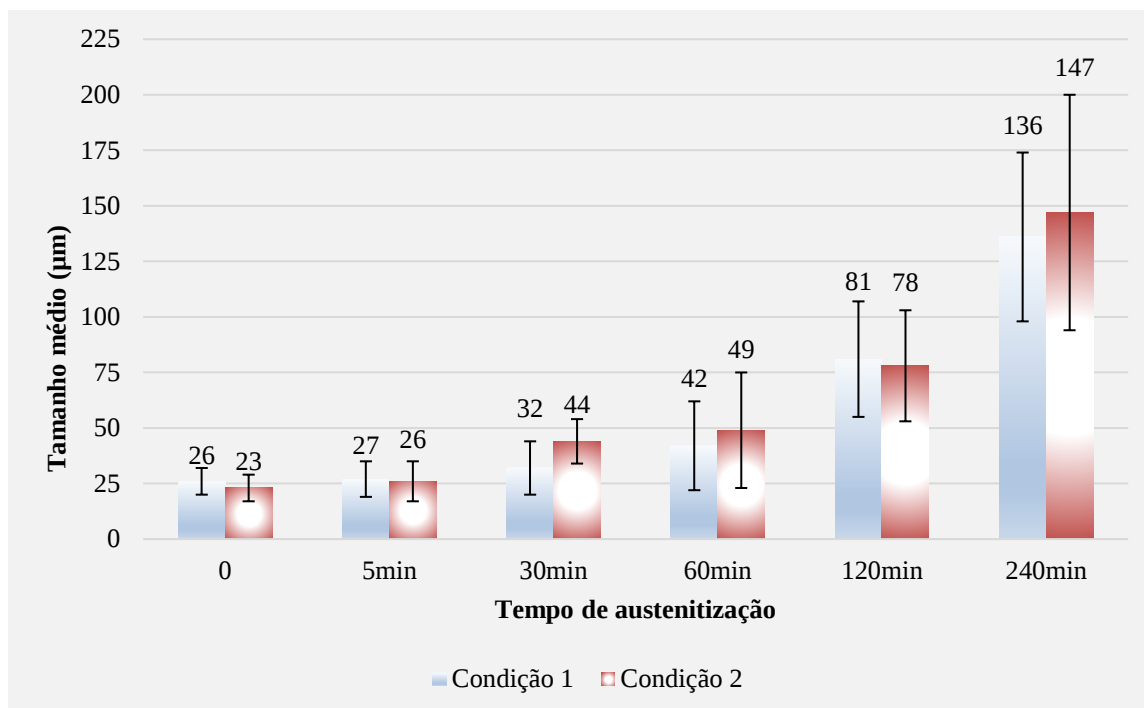


Figura 10. Tamanho de grão austenítico prévio, em micrometro, das amostras do aço 410D.

4. CONCLUSÃO

Diante das evidências produzidas nesta pesquisa, segundo a análise e discussão dos resultados aqui explanados, as seguintes conclusões são apresentadas:

Em relação a microestrutura foi observado que o material que passou por recozimento intercrítico não obteve variação significativa do tamanho de grão ferrítico, entretanto ocorreu aumento de precipitados de carboneto de cromo. As micrografias após o processo de têmpera, em ambas as condições, apontam para aumento da largura e tamanho da martensita com aumento do tempo de austenitização, fenômeno associado ao aumento do tamanho do grão austenítico prévio.

O presente trabalho também observou que o aço 410D pode ser endurecido quando austenitizado e temperado em água. Em relação a amostra como recebida, a condição 1 teve um aumento de dureza máximo de 97%, já a condição 2 de 108%. O resultado de dureza da condição 2 foi superior possivelmente pelo aumento da presença de carboneto de cromo nas amostras recozidas a uma temperatura intercrítica. Entretanto, com aumento do tempo de austenitização ocorreu um amaciamento das amostras, a queda de dureza está associada a diminuição da área total de contorno de grão que facilita o movimento de discordância.

5. REFERÊNCIAS

Arruda, A.A.F., Carvalho, A.C., Moreira, P.S.; Queiroz, R.R.U., Faria, G.L., 2018. Características da camada de óxidos formada no aço inoxidável 410d após tratamentos isotérmicos em atmosfera oxidante. *73º Congresso Anual da ABM*. São Paulo, Brasil.

Alvarez, L.F., Garcia C. e Lopez V, 1994. Continuous cooling transformations in martensitic stainless steels. *ISIJ Int.* Vol. 34, p. 516-521.

APERAM, 2022. DIN WS 1.4003/UNS S41003 – Aço Inoxidável Ferrítico para aplicações estruturais e de desgaste. 1 Dez. 2022 < <https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/DIN-WS-1.4003UNS-S41003-Ferritic-Stainless-Steel.pdf>>

ASTM A276, 2013. “Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes”. ASTM Internacional, West Conshohocken, PA.

ASTM R 92-82, 2013. “Test Method for Vickers Hardness of Metallic Material”. ASTM Internacional, West Conshohocken, PA.

ASTM E407 – 07, 2015. “Standard Practice For Microetching Metals And Alloys”. ASTM Internacional, West Conshohocken, PA.

Askeland, D. R. e Phulé, P.P, 2023. *Ciência e engenharia dos materiais*. Cengage Learning, São Paulo: 1a edição.

- Bettanini, A.M., Ding, L., Mithieux, J., Parrens, C., Idrissi, H., Schryvers, D., Delannay, L., Pardoën, T. e Jacques, P., 2019. Influence of M23C6 dissolution on the kinetics of ferrite to austenite transformation in Fe-11Cr-0.06C stainless steel. *Materials and design*, Vol. 162, p. 362-347.
- Boniardi, M. e Casaroli, A., 2014. *Stainless Steels*. Lucefin, Brescia: 1ª edição.
- Callister, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. John Wiley & Sons, Inc., 2002
- Chiaverini, V., 2002. *Aços e ferros fundidos*. ABM, São Paulo, 7ª edição.
- Silva, A.L.V.C e Mei, P.R., 2010. *Aços e ligas especiais*. Edgard Blucher, São Paulo: 3ª edição.
- Faria, G.L., Godefroid, L.B, Nunes, I. P. e Lacerda, J. C., 2020. Effect of martensite volume fraction on the mechanical behavior of an UNS S41003 dual-phase stainless steel. *Materials Science and Engineering A-Structural. Materials Properties Microstructure and Processing*, Vol. 797, artigo 140208.
- Faria, G.L, Godefroid, L.B e Menezes, V.S, 2015. Development of a Methodology for Structural and Mechanical Characterization of Extended Sheets Made from Stainless Steels. *Materials Research*, V. 18, p. 76-82.
- Guimarães, J. R. C. e Rios, P. R., 2010. Martensite starts temperature and the austenite grain-size. *Journal of Materials Science*, Vol. 45, p. 1074-1077.
- Nunes, I.P.; G.L. Faria, J.C. Lacerda e L.B. Godefroid, 2019. Influência de Tratamentos Térmicos de Têmpera com Austenitização Intercrítica no Comportamento Mecânico de um Aço Inoxidável Ferrítico do Tipo UNS S41003, in: *74º Congresso Anual da ABM*, São Paulo, Brasil.
- Vilela, L.B.M., Faria, G.L., Alcântara, C.M., Oliveira, T.S. e Cota, A.B., 2019. Efeito da taxa de resfriamento sobre a formação de martensita em um aço inoxidável ferrítico com 11 %Cr e baixos teores de intersticiais. *Revista Materia*. V. 24, p. 1–11.
- Labiapari, W.S, Alcântara, C.M, Costa, H. e Mello J.D.B, 2013. Stainless steel as an antiwear material for the bio-fuel industry. *Wear*, Vol. 302, p. 1536-1545.
- Modenesi, P.J, 2001. *Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis*. SENAI-SP, São Paulo: SENAI-SP.
- Moura, A.N, Alcântara, C.M., Vieira, E.A., Rodrigues, D.G., Lapiapari, W.S., Cunha, M.A., Oliveira, T.R., Orlando, M.T.D, 2022. Microstructure and crystallographic texture of martensitic stainless steels after cold rolling and subsequent recrystallization. *Materials Characterization*. Vol. 192, p. 112190.
- Serna-Girardo, C. A.; Ide, C. R.; magnabosco, R.; kunioshi, C. T.; Alonso-Falleiros, N., 2007. Investigação do efeito do teor de intersticiais sobre o grau de sensitização em aços inoxidáveis ferríticos a 600°C. REM. *Revista Escola de Minas (Impresso)*, Vol. 60, n. 1, p. 49-54.
- Shackelford, J. F., 2008. *Ciência dos materiais*. Pearson Education do Brasil, São Paulo, 6ª edição.
- Souza, S.S., 2018. *Estudo da Cinética de Transformação Martensítica em um Aço Microligado USISAR 80T*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Sundqvist, J., Mannien, T., Heikkinen, H.P, Anttila, S. e Kaplan, A.F.H, 2018. Laser surface hardening of 11 % Cr ferritic stainless steel and its sensitisation behaviour, *Surf. Coatings Technol.*, Vol. 344, p. 673–679.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF S41003 STEEL WHEN SUBMITTED TO DIFFERENT HEAT TREATMENTS

Renata Rodrigues Alves

José Lucio Gonçalves Junior

Universidade Federal de Goiás

renata_rodrigues@ufg.br

jlucio@ufg.br

Daniel Fernandes Cunha

Universidade Federal de Goiás

danielcunha@ufg.br

Kléber Mendes de Figueiredo

Universidade Federal de Goiás

kleberfig@ufg.br

Geraldo Lucio De Faria

Universidade Federal de Ouro Preto

geraldofaria@ufop.edu.br

Wilian da Silva Labiapari

Aperam South America

wilian.labiapari@aperam.com

Abstract. *Stainless steel is known for its resistance to corrosion and oxidation at high temperatures. However, ferritic stainless steels have low hardness and theoretically cannot be fully austenitized, therefore they do not harden by heat treatment. Despite ferritic stainless steel 410D (S41003) having a relatively simple chemical composition, with only 0.015% by weight of carbon, previous studies indicate that this alloy can be fully or partially hardened by heat treatment. Therefore, this study aims to analyze the effect of different heat treatment conditions on the microstructure and hardening of the material. As methodology, two heat treatment conditions were performed, in the first condition the samples were heated to 1000 °C, varying the austenitization time at 5 min, 30 min, 60 min, 120 min and 240 min, then quenched in water. For the second condition, the samples underwent an intercritical annealing at 800 °C for 1h and were cooled in the furnace, then the samples were heated to 1000 °C, varying the austenitization time at 5 min, 30 min, 60 min, 120 min and 240 min and quenched in water. The microstructural analysis indicated that the as-received material has a polygonal ferritic structure with precipitation of Cr₂₃C₆ type carbide, and the intercritical annealing treatment generated the precipitation of more chromium carbide. After the quenching treatment, the qualitative analysis corroborated with previous studies indicating an increase in martensite laths, due to the increase in grain size. The hardening results indicate that the alloy can be hardened by quenching, but when the material undergoes a prior a intercritical annealing process, the hardness increases. Furthermore, the longer the samples are kept at the austenitizing temperature, the lower the post-quenching hardness, which is associated with the increase in austenitic grain size.*

Keywords: *Stainless steel. Microstructural characterization. Hardness. Grain size. Chromium carbide.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.