

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA DUREZA DO AÇO CA6NM PARA VASOS DE PRESSÃO

Bruno da Silva de Paiva, bruno0paiva22@gmail.com¹
Vinicius Tavares Heuser, vinciusth@gmail.com¹
Samuel Leite dos Santos, samuelleitesto@gmail.com¹
Renato Pereira de Freitas, renato.freitas@ifrj.edu.br¹
André Rocha Pimenta, andre.pimenta@ifrj.edu.br¹

¹Nome Laboratório de Instrumentação e Simulação Computacional – LISComp, Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ, Rua Sebastião Lacerda, s/nº, centro, Paracambi – RJ, Brasil.

Resumo. Vasos de pressão são equipamentos importantes em indústrias em diversos processos. Visando estudar e analisar esses equipamentos, foi utilizado um vaso de pressão de aço supermartensítico CA6NM onde foram realizados diferentes tratamentos térmicos com a finalidade de compreender como a dureza varia e observar como essa variação influencia na microestrutura do material. São confeccionados 7 corpos de prova e submetidos a têmpera e revenido com diferentes parâmetros. O ensaio de dureza utilizado é a dureza Vickers e os resultados são comparados com a norma ASTM A743. É possível concluir que o vaso de pressão na condição como recebido não estava de acordo com a norma e que o tratamento térmico de têmpera seguido de revenido a 565 graus celsius por 8 horas se mostrou o mais eficaz em ajustar a dureza do vaso de pressão ao exigido pela norma ASTM A743.

Palavras chave: Vaso de pressão. Dureza. Tratamento térmico. Falha.

Abstract. Pressure vessels are important equipment in industries in various processes. In order to study and analyze this equipment, a CA6NM supermartensitic steel pressure vessel was used, where different heat treatments were performed in order to understand how the hardness varies and observe how this variation influences the microstructure of the material. Seven test specimens were prepared and subjected to quenching and tempering with different parameters. The hardness test used was the Vickers hardness and the results were compared with the ASTM A743 standard. It is possible to conclude that the pressure vessel in the as-received condition did not comply with the standard and that the heat treatment of quenching followed by tempering at 565 degrees Celsius for 8 hours proved to be the most effective in adjusting the hardness of the pressure vessel to that required by the ASTM A743 standard.

Keywords: Pressure vessel. Hardness. Heat treatment. Failure.

1. INTRODUÇÃO

Vasos de pressão são equipamentos utilizados em diversos setores industriais, como a indústria de petróleo, química e até mesmo em laboratórios visando armazenar diferentes fluídos ou gases sob pressão. Um vaso de pressão pode armazenar diferentes tipos de fluídos, com pressão e temperatura determinadas por cada projeto visando a análise ou aplicação específica para tal fluído (Telles, 1986). Desta forma, tem-se uma grande variedade de vasos de pressão demandados, e um dos fatores que implica na escolha correta das características de vaso de pressão é a composição do fluído. Nesses casos, o projeto e o processo de fabricação tornam-se específicos para aquela aplicabilidade do equipamento, ou seja, cada projeto de um vaso de pressão é único. Uma vez que é fabricado de forma inadequada, não seguindo os processos especificados pela norma, o equipamento poderá não suportar as condições de operação com um determinado fluído. Podendo falhar em determinadas temperaturas e pressões, ou até mesmo deteriorar o material do equipamento, tendo em vista a possibilidade de o fluído possuir características corrosivas.

Os vasos de pressão, por conta da condição de trabalho que operam, são equipamentos complexos. Diversas falhas nesse tipo de equipamento são observadas na literatura, relacionadas a fabricação inadequada, problemas de projeto e uso inadequado. Em 2023, Puwanto e colaboradores (Purwanto et al., 2023) verificaram um vazamento externo na lateral de um vaso de pressão, resultante de uma falha. Wang e colaboradores (Wang et al., 2023) mostraram que em geral, condições extremas de trabalho dentro dos vasos de pressão podem induzir a rachaduras e falhas. Em 2024, Kawiak e Kochmanski (Kawiak and Kochmański, 2024) verificaram falhas num vaso de pressão analisando sua microestrutura.

Um dos aços inoxidáveis comumente utilizados para fabricação de vasos de pressão é o aço inoxidável supermartensítico CA6NM. Para que esse aço possa trabalhar corretamente, a norma ASTM A743 (ASTM, 2021) estabelece as propriedades requeridas para o material. A norma também estabelece o tratamento térmico a ser utilizado

para obter-se as propriedades: Aquecer a uma temperatura mínima de 1010 graus Celsius e resfriar ao ar. O revenido final deverá estar entre 565 e 620 graus Celsius. Contudo, os parâmetros apontados na norma são bem abrangentes.

O objetivo deste trabalho é compreender como varia a propriedade de dureza do aço CA6NM quando submetido a diferentes tratamentos térmicos de revenido. Os resultados de dureza serão correlacionados com as mudanças microestruturais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram confeccionados 7 corpos de prova em condições distintas. Seções de um vaso de pressão fabricado de aço supermartensítico CA6NM foram cortados por uma cortadora metalográfica. Análise química foi realizada no material utilizado neste trabalho, e os resultados são apresentados na Tabela 1 e comparados com o exigido pela norma ASTM A743 (ASTM, 2021).

Tabela 1. Análise química da amostra do aço supermartensítico CA6NM comparado com o exigido pela norma. Valores em percentual em peso.

ELEMENTOS	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V
ANÁLISE	0,042	1,00	0,71	0,03	0,007	12,02	4,59	0,75	0,17	0,03	0,04
NORMA A743 (ASTM, 2021)	0,06*	1,00*	1,00*	0,04*	0,03*	11,5-14,0	3,5-4,5	0,4-1,0	-	-	-

* Indica valores máximos permitidos.

Todos os corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico de têmpera a 1030 graus celsius por 40 minutos, seguido de resfriamento. Após a têmpera, o revenido foi realizado de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 2. No corpo de prova submetido ao tratamento de duplo revenido foi realizada a têmpera a 1030 graus celsius por 40 minutos, em seguida o revenido a 670 graus celsius por 3 horas e após resfriado, novamente revenido a 565 graus celsius por 1 hora, como descrito na Tabela 3. Todos os resfriamentos dos tratamentos térmicos de revenido foram realizados ao ar.

As amostras foram embutidas em baquelite condutora PolyFast da marca Struers e preparadas metalograficamente por procedimento padrão de lixamento, polimento e ataque químico com reagente Villela (5 mL HCl + 2 g ácido pícrico + 100 mL álcool etílico). O ataque foi realizado por 10 segundos com a amostra submersa no reagente. O ataque químico tem como finalidade a observação em MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura, modelo Hitachi TM 4000 plus.

Com os corpos de prova lixados em granulometria 1200, foram submetidos ao ensaio de dureza Vickers em um microdurômetro modelo InnovaTest Falcon 400, com carga ajustada para 2 quilogramas. Foram realizadas 20 indentações em cada amostra e essas foram medidas pelo próprio equipamento. Os ensaios foram realizados segundo a Norma ABNT 6507-1 (ABNT, 2008).

Tabela 2. Condições dos corpos de prova confeccionados para os ensaios realizados.

CORPO DE PROVA	TEMPERADO (temperatura)	TEMPERADO (tempo)	REVENIDO (temperatura)	REVENIDO (tempo)
1	1030 °C	40 minutos	565 °C	3 horas
2	1030 °C	40 minutos	565 °C	8 horas
3	1030 °C	40 minutos	600 °C	3 horas
4	1030 °C	40 minutos	600 °C	8 horas
5	1030 °C	40 minutos	670 °C	3 horas
6	1030 °C	40 minutos	670 °C	8 horas

Tabela 3. Condições do corpo de prova submetido ao tratamento térmico de duplo revenido.

CORPO DE PROVA	TEMPERADO (temperatura)	TEMPERADO (tempo)	REVENIDO I (temperatura)	REVENIDO I (tempo)	REVENIDO II (temperatura)	REVENIDO II (tempo)
7	1030 °C	40 minutos	670 °C	3 horas	565 °C	1 hora

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizando o ensaio de dureza Vickers, os resultados são apresentados na Tabela 4. É possível perceber um aumento da dureza com o aumento da temperatura do tratamento térmico de revenido. Observando a amostra revenida à 670°C

durante 8h, foi medido 367 HV aproximadamente. Já na amostra de 565°C durante 8h, é encontrado 303 HV. Também é observado a diferença de dureza das amostras tratadas termicamente para o material como recebido. A dureza da amostra na condição como recebido é aproximadamente 508 HV, acima da dureza estipulada pela norma ASTM A743, em torno de 302 HV.

Tabela 4. Ensaio de Dureza Vickers realizado nos corpos de prova com diferentes condições.

AMOSTRA	DUREZA VICKERS
565 3h	319 ± 5
565 8h	303 ± 10
600 3h	321 ± 5
600 8h	317 ± 4
670 3h	362 ± 5
670 8h	367 ± 4
Duplo Revenido	314 ± 9
Temperado	440 ± 6
Como Recebido	508 ± 5

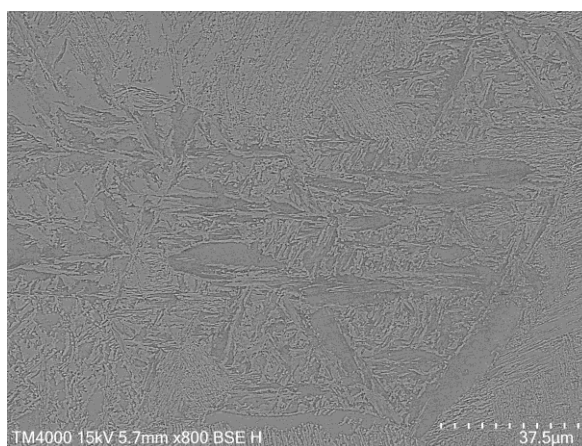
Observando as imagens de microscopia eletrônica de varredura na Figuras 1, são percebidas diferenças nas microestruturas quando observado as diferentes condições. O aumento de dureza visto na Tabela 4 pode ser sustentado pela formação de martensita fresca. A microestrutura do material sendo majoritariamente constituída de martensita, promove, no processo de aquecimento do revenido, a formação de austenita reversa. Já no processo de resfriamento, a austenita reversa formada poderá se transformar em martensita fresca. Logo, martensita fresca também é chamada de martensita não revenida e possui como uma de suas principais características a dureza elevada.

A formação e a morfologia dessa estrutura foi discutida por Escobar (Escobar et al., 2019). O trabalho aponta que não há diferença morfológica clara entre a martensita fresca e austenita estável, visto que ambas são produtos da austenita reversa durante o revenido. O tratamento térmico de duplo revenido é realizado com a finalidade de equilibrar a dureza e tratar termicamente a martensita fresca formada. A não realização desta etapa do tratamento térmico poderia resultar na diminuição severa das boas propriedades mecânicas do material.

Com o objetivo de encontrar o tratamento térmico nas condições corretas que provoque uma dureza próxima a norma ASTM A743, é visto na Fig. 3 que o tratamento de têmpera a 1030°C durante 40 minutos, seguido de revenido a 565°C durante 8 horas obteve dureza de 303 HV, compatível com a dureza exigida pela norma, de 302 HV.



(A)



(B)

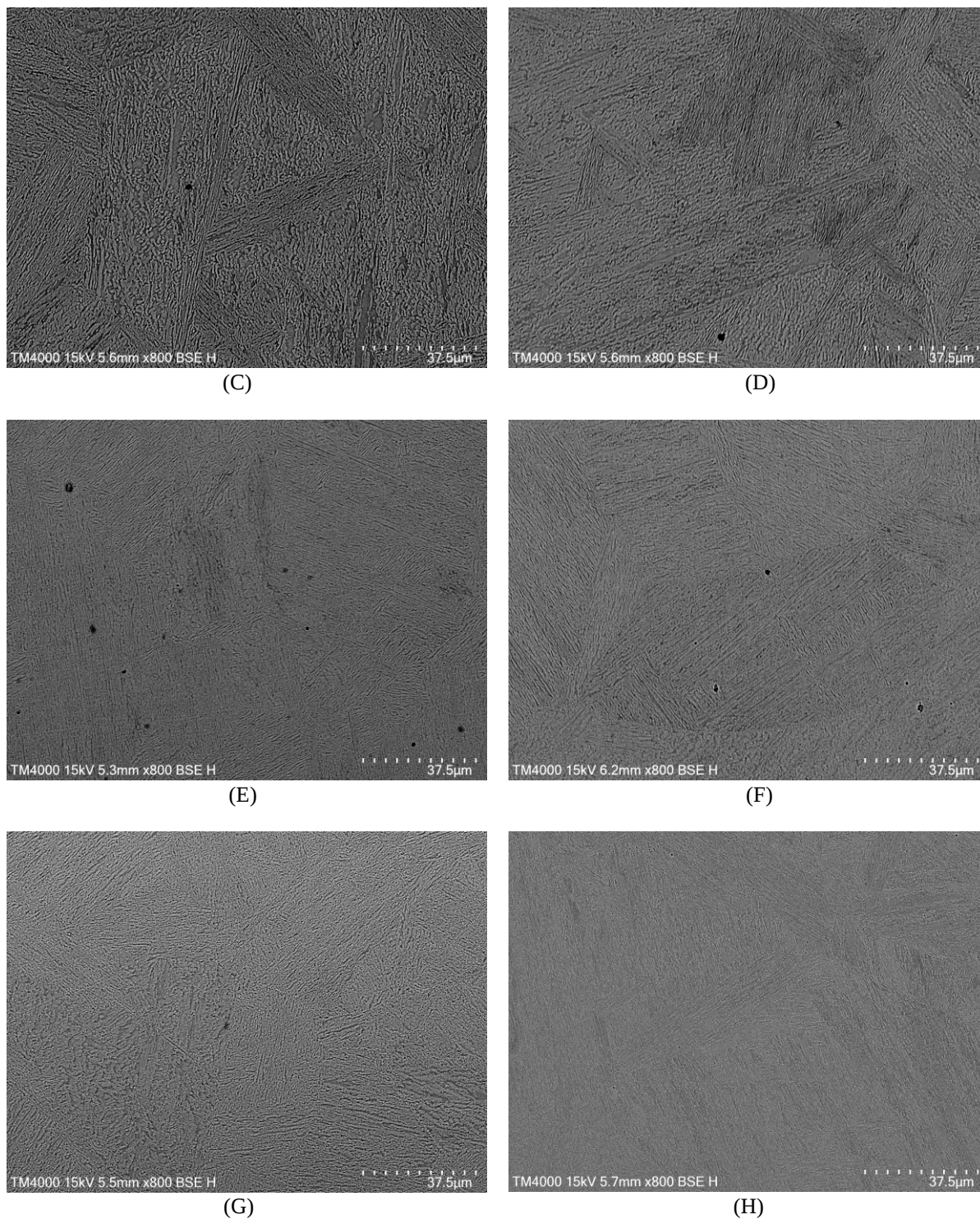


Figura 1. Microestrutura das amostras tratadas termicamente com diferentes condições. (A) 565°C por 3 horas. (B) 565°C por 8 horas. (C) 600°C por 3 horas. (D) 600°C por 8 horas. (E) 670°C por 3 horas. (F) 670°C por 8 horas. (G) Amostra tratada com duplo revenido. (H) Amostra apenas temperada a 1030°C.

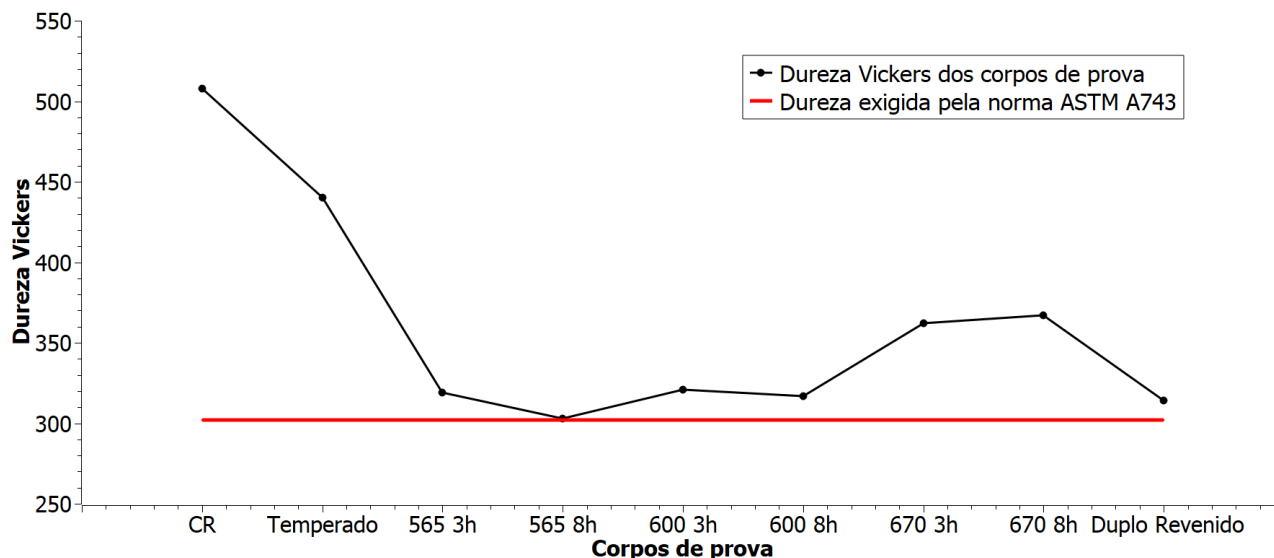


Figura 3. Gráfico de comparação de dureza entre os corpos de prova com a norma ASTM A743.

A Fig. 3 apresenta uma comparação entre a dureza exigida pela norma e a dureza medida nos corpos de prova em diferentes condições. É observado que o vaso de pressão como recebido apresenta dureza de 508 HV. A Norma ASTM A743 determina 302 HV para o aço supermartensítico CA6NM, representado pela linha vermelha. O corpo de prova temperado a 1030 °C e revenido a 565 °C durante 8 horas obteve dureza próxima a 302 HV, tornando-se o corpo de prova com propriedades mecânicas mais semelhantes com a norma.

4. CONCLUSÃO

Visto os ensaios realizados em todos os corpos de prova e analisando os resultados obtidos, é possível concluir:

- A dureza do vaso de pressão na condição como recebido não estava de acordo com a norma ASTM A743.
- O tratamento térmico de têmpera a 1030°C durante 40 minutos, seguido de revenido a 565°C durante 8 horas se mostrou o mais eficaz em promover uma dureza no material próxima ao exigido pela norma ASTM A743.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro e a bolsa de Iniciação Científica concedidos para realização do projeto pelo Edital IFRJ PIBIC 2025.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT, 2008. 6507-1 Metallic materials - Vickers hardness test. Part 1: Test method. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ASTM, 2021. A743/A743M Standard specification for castings, iron-chromium, iron-chromium-nickel, corrosion resistant, for general application. ASTM International.
- Escobar, J.D., Faria, G.A., Maia, E.L., Oliveira, J.P., Boll, T., Seils, S., Mei, P.R., Ramirez, A.J., 2019. Fundamentals of isothermal austenite reversion in a Ti-stabilized 12Cr – 6 Ni – 2 Mo super martensitic stainless steel: Thermodynamics versus experimental assessments. *Acta Materialia* 174, 246–259. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.05.026>
- Kawiak, M., Kochmański, P., 2024. Degradation of the welded joint microstructure of a 40-year-old pressure vessel made OF 16Mo3 steel. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108227>
- Purwanto, T.S., Permana, D.I., Nurbansari, M., Abdurrachim, Sirodz, M.P.N., 2023. Failure Analysis of Low-Pressure Evaporator in Heat Recovery Steam Generator with 200 ton/h of Capacity. *J Fail. Anal. and Preven.* 23, 2575–2587. <https://doi.org/10.1007/s11668-023-01769-7>
- Telles, P.C. da S., 1986. Materiais para equipamentos de processos, 3rd ed, 3. Editora Interciência LTDA.
- Wang, M., Guo, K., Wei, Y., Chen, J., Cao, C., Tong, Z., 2023. Failure analysis of cracking in the thin-walled pressure vessel of electric water heater. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106913>

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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