

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

COMPORTAMENTO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO TRATAMENTO TÉRMICO DO AÇO AISI 4340

Caio Sérgio Maquito de Paiva Torres - caiosergius@id.uff.br

Leticia Fernandes da Silva - leticiafernandes@id.uff.br

Marcel Freitas de Souza - marcelfreitas@id.uff.br

Mateus Campos Martins - mateuscampos@id.uff.br

Leosdan Figueredo Noris - leosdanfnoris@gmail.com

Juan Manuel Pardal - juanpardal@vm.uff.br

Maria Cindra Fonseca - mcindra@vm.uff.br

Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC - Niterói, RJ, Brasil

Resumo. Os tratamentos térmicos são indispensáveis na indústria, pois promovem melhorias nas propriedades mecânicas e microestruturais dos aços, sendo aplicáveis no produto final ou em etapas intermediárias do processo de fabricação. No presente trabalho foi estudado o comportamento das tensões residuais e das propriedades mecânicas, tais como dureza e tenacidade ao impacto, do aço AISI 4340 quando temperado a 860°C em óleo, e revenido a diferentes temperaturas. As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X, utilizando o método do $\sin^2\psi$ e comparadas com a análise das propriedades magnéticas obtidas por ruído magnético Barkhausen (RMB). Após a têmpera, foram encontradas tensões residuais de natureza trativa em todas as amostras. O tratamento térmico de revenido provocou relaxação das tensões em todas as temperaturas estudadas, porém permanecendo trativas nas amostras revenidas a 350°C e 450°C, e tornando-se compressivas somente no grupo revenido a 550°C. Com o aumento da temperatura de revenido, observou-se uma redução significativa na dureza do material, em oposição ao RMB e à tenacidade ao impacto, que apresentaram aumento proporcional ao aumento de temperatura de revenido.

Palavras-chave: Aço AISI 4340, Tratamento térmico, Tensões residuais, Dureza, Tenacidade ao impacto.

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico nas diversas aplicações industriais exige o desenvolvimento e a utilização de materiais com melhores propriedades mecânicas, pois em aplicações críticas,

essas propriedades desempenham importante papel no desempenho de componentes mecânicos. Com a busca por redução de peso, custo e número de componentes, o projeto torna-se menos conservador (Bin *et al.*, 2017).

O aço de alta resistência AISI 4340 é amplamente utilizado em inúmeras aplicações estruturais na indústria automobilística, aeroespacial e naval por apresentar altas tenacidade e resistência mecânica, bem como boa resistência à fadiga (Khan e Bhivane, 2018). Suas aplicações variam desde eixos sob altas solicitações, engrenagens e bielas até componentes relativamente pequenos como pinos, pinças, pinhões (Kumaret *et al.*, 2017).

À medida que o projeto de componentes mecânicos se torna menos conservador, há um aumento no interesse em como as tensões residuais afetam propriedades mecânicas dos materiais. Isto acontece porque a falha prematura de um componente estrutural pode ser causada pelo efeito combinado de tensões residuais e aplicadas (Withers e Bhadeshia, 2001).

O surgimento das tensões residuais (TR) é inerente aos processos de fabricação, e, dependendo da natureza, elas podem ser benéficas ou deletérias. As tensões residuais compressivas são benéficas por mitigar a nucleação e a propagação de trincas de fadiga, enquanto que tensões residuais trativas são deletérias por diminuir a vida em serviço de componentes e estruturas (Cindra Fonseca *et al.*, 2017).

Os tratamentos térmicos têm a capacidade de alterar as propriedades mecânicas dos metais, principalmente os ferrosos. Os aços sofrem transformações quando estão sob temperaturas elevadas, sendo possível atingir as características desejadas no processamento térmico desses materiais (Totten, 2007). Segundo Bhadeshia e Honeycomb (2006), a têmpera é a maneira mais utilizada para a obtenção de elevada resistência mecânica em aços, provocando o endurecimento do material, seguida de revenimento, que caracteriza o aumento de tenacidade do material sem que ocorram perdas significativas em sua resistência. Contudo, os tratamentos térmicos inevitavelmente geram tensões residuais nas peças, resultantes da superposição dos efeitos termomecânicos e das transformações de fase durante o resfriamento (Schulze *et al.*, 2010).

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da têmpera e das diferentes temperaturas de revenido sobre o estado final de tensões residuais e propriedades mecânicas do aço AISI 4340. Para estudar as tensões residuais faz-se uso da técnica de difração de raios-X, comparando-se esses resultados com os de ruído magnético Barkhausen (RMB), já que esta técnica não fornece diretamente valores de tensões residuais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada no presente trabalho uma barra de aço AISI 4340 com 50,8 mm de diâmetro, fornecida pela Villares Metals. A composição química e as propriedades mecânicas do material, bem como os requisitos estabelecidos pela norma ASTM A829/A829M, estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Composição química do aço AISI 4340 (% em peso).

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
Fabricante	0,39	0,69	0,29	<0,005	<0,001	0,76	1,72
Norma	0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	0,15 - 0,35	0,04 (máx)	0,04 (máx)	0,70 - 0,90	1,65 - 2,00

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço AISI 4340, como recebido.

σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)
765	960	14,8	302

Foram fabricadas 9 amostras com dimensões semelhantes ao corpo de prova Charpy (10,5 mm x 10,5 mm x 55 mm) e 3 amostras menores a partir da barra de aço AISI 4340. Todas as amostras foram submetidas ao mesmo ciclo de tratamentos térmicos. As 9 amostras maiores foram utilizadas para medição das tensões residuais por difração de raios-X, ensaio de impacto e análise de RMB, enquanto que as 3 amostras menores foram utilizadas para ensaio de dureza.

As amostras foram separadas em grupos, cada um composto de 3 amostras semelhantes ao corpo de prova Charpy e uma amostra pequena. Todas as amostras foram submetidas inicialmente ao tratamento térmico de têmpera realizado em forno tubular com atmosfera controlada de argônio para evitar decarbonetação. A têmpera foi realizada a 860°C por 60 minutos seguida de resfriamento em óleo. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao revenido em 3 temperaturas distintas: 350°C, 450°C e 550°C. A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados no tratamento térmico para cada grupo.

Tabela 3 - Grupos e parâmetros utilizados no tratamento térmico.

Grupo	Amostras	Têmpera	Revenido
A	I, II, III	860°C	350°C
B	I, II, III		450°C
C	I, II, III		550°C

No ensaio de dureza foi utilizado um durômetro do fabricante Wilson Hardness – Rockwell 2000, munido de um penetrador de ponta cônica de diamante com pré-carga de 10 kgf e carga de 150 kgf por 3 segundos para cada medição na escala Rockwell C. O ensaio de dureza foi realizado nas amostras após a têmpera em um dos grupos, e após o revenido em todos os grupos.

As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X utilizando o método do $\text{sen}^2\psi$ nas amostras após os tratamentos térmicos de têmpera e revenido fazendo-se uso do analisador de tensões *XStress 3000* fabricado pela *Stresstech*. As tensões residuais foram medidas nas amostras termicamente tratadas utilizando a radiação $\text{CrK}\alpha$, difratando o plano {211} da ferrita na direção longitudinal.

O ruído magnético Barkhausen foi avaliado na direção longitudinal da amostra, sendo submetida a dois ciclos de magnetização, com frequência de excitação de 10 Hz e 50 Hz, respectivamente. A taxa de amostragem foi mantida a 350 kHz. Foram gravadas 11 repetições de cada condição de medida. Em seguida, os dados foram tratados por meio de um programa elaborado no MATLAB para obtenção do valor eficaz de todas as repetições, com 35000 valores de medições de RMB em cada uma.

Para avaliar a tenacidade ao impacto e a expansão lateral foi utilizado um pêndulo universal do fabricante Heckert com capacidade máxima de 300 J e precisão de 0,5 J à temperatura ambiente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de dureza encontrados para as amostras estudadas nas condições como recebido, temperadas a 860°C em óleo, e revenidas nas diferentes temperaturas são apresentados na Tabela 4 e na Figura 1.

Tabela 4 - Valores de dureza nas diferentes condições de tratamento térmico.

Grupo	Dureza [HRc]		
	Como recebido	Têmpera	Revenido
A	-	-	46,42 ± 0,58
B	29,00 ± 0,55	52,35 ± 0,43	41,84 ± 0,69
C	-	54,38 ± 0,80	36,94 ± 0,30
Média [HRc]	29,00 ± 0,55	53,40 ± 1,20	---

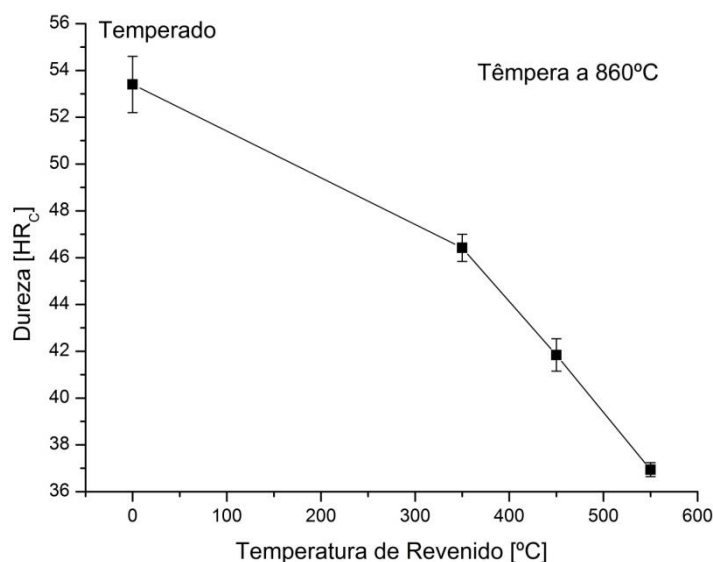


Figura 1 – Dureza Rockwell C vs. Temperatura de Revenido.

A têmpera em óleo provocou um aumento significativo de 84% no valor de dureza, em relação ao material como recebido, sendo a dureza média após esse tratamento térmico de $53,40 \pm 1,20$ HRc.

O revenido promoveu redução nos valores de dureza quando comparado com os valores obtidos na medição do material somente temperado. Pode ser observado na Figura 1 que, com o aumento da temperatura de revenido, há uma redução gradativa nos valores de dureza. O grupo que apresentou maior redução nessa propriedade foi o grupo C, revenido a 550°C , que gerou uma redução de mais de 30% na dureza em relação ao material temperado.

Os resultados obtidos são coerentes com os descritos pela ASM (1991) que estabelece que o tratamento térmico de revenido gera reduções nos valores de dureza, e a temperatura tem um efeito significativo neste decréscimo. Além disso, a curva dureza vs. temperatura de revenido projeta a mesma tendência que a curva representada por Materkowski e Krauss (1979), que encontraram valores de dureza de 47 HRc para a temperatura de revenido de 350°C e 42 HRc para 450°C .

A Tabela 5 e a Figura 2 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de tenacidade ao impacto Charpy realizados à temperatura ambiente.

Tabela 5 - Energia absorvida e expansão lateral nas diferentes condições de tratamento térmico.

Grupo	Energia Absorvida [J]	Expansão Lateral (%)
A	19,83 ± 0,29	1,55
B	36,67 ± 4,86	2,19
C	72,67 ± 3,79	7,61

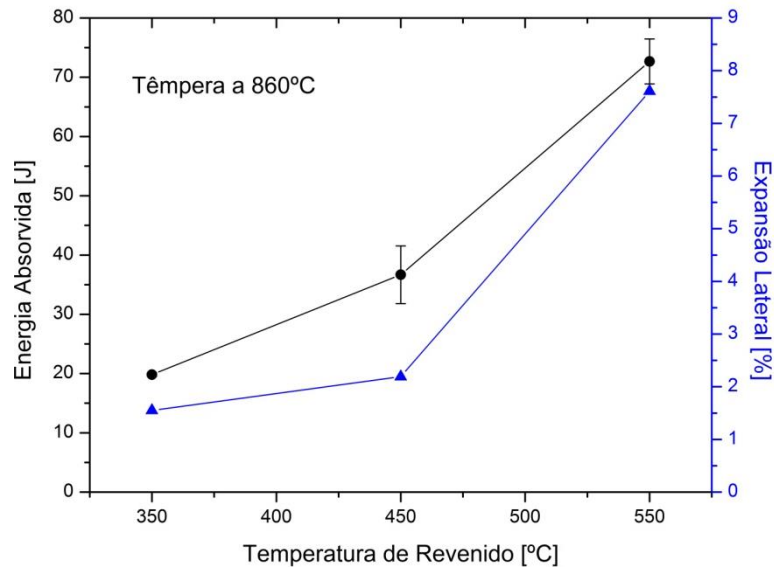


Figura 2 - Energia absorvida e expansão lateral em função da temperatura de revenido.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de impacto pode-se observar um aumento nos valores de energia absorvida proporcional ao aumento da temperatura de revenido. Além disso, observa-se que houve um aumento expressivo na tenacidade ao impacto quando comparadas as temperaturas de revenido de 450°C e 550°C. Os resultados encontrados são coerentes com os descritos por Lee *et al.* (1989), que encontraram valores de energia absorvida de aproximadamente 19J para o aço 4340 revenido a 350°C e 31J para revenido a 425°C.

Analogamente a energia absorvida no impacto Charpy, observa-se um aumento gradativo nos valores de expansão lateral para um aumento na temperatura de revenido.

As curvas de energia absorvida vs. temperatura de revenido e expansão lateral vs. temperatura de revenido apresentam comportamentos semelhantes, sendo possível evidenciar valores de tenacidade ao impacto do grupo C expressivamente maiores quando comparados com o grupo B. Desta forma, pode ser observado o fenômeno de fragilização ao revenido nas temperaturas de 350°C e 450°C, que está dentro da faixa crítica de revenimento para o aço AISI 4340.

Os valores de tensões residuais encontrados para cada amostra, bem como os valores médios de cada grupo, são apresentados na Tabela 6 e na Figura 3.

Tabela 6 - Tensões residuais nas diferentes condições de tratamentos térmicos.

Grupo	Amostra	Tensões Residuais [MPa]			
		Têmpera		Revenido	
A	I	395 ± 9	251 ± 125	140 ± 10	135 ± 28
	II	170 ± 7		105 ± 4	
	III	190 ± 5		160 ± 10	
B	I	500 ± 18	343 ± 136	85 ± 8	57 ± 28
	II	260 ± 14		30 ± 11	
	III	270 ± 6		55 ± 3	
C	I	220 ± 17	445 ± 203	-35 ± 1	-13 ± 26
	II	500 ± 5		-20 ± 6	
	III	615 ± 20		15 ± 1	

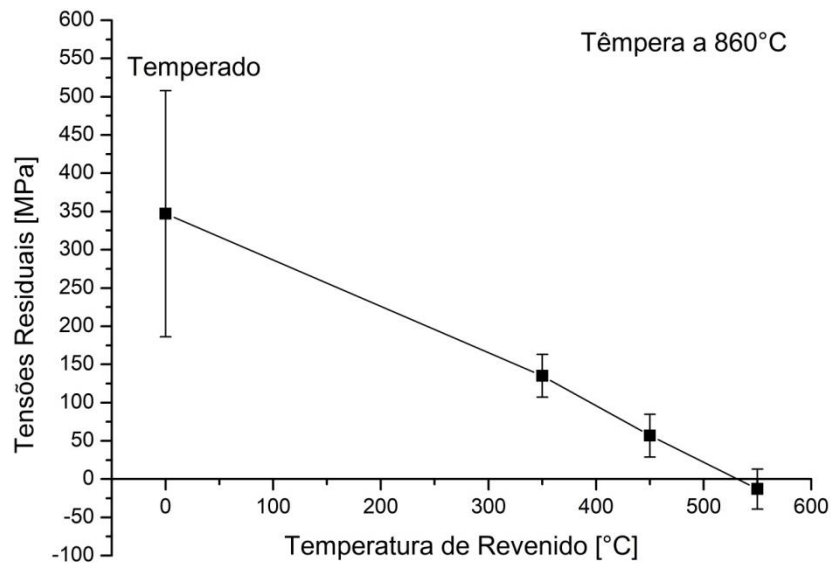


Figura 3 - Tensões Residuais vs. Temperatura de Revenido.

Em todas as amostras, após a têmpera, foram obtidos valores de tensões residuais de natureza trativa. O maior valor amostral encontrado foi 615 ± 20 MPa, enquanto a média global das tensões residuais após a têmpera foi de 347 ± 161 MPa.

Todos os tratamentos térmicos de revenido levaram à redução no nível de tensões residuais das amostras. Contudo, os grupos A e B (revenidos a 350°C e 450°C, respectivamente) apresentaram tensões residuais de natureza trativa mesmo após o alívio de tensões, e o único grupo que apresentou um estado de tensões de natureza compressiva foi o grupo C (revenido a 550°C), com média de tensões residuais de $-13,33 \pm 25,66$ MPa. Este resultado é benéfico para o material, pois significa um aumento na vida em fadiga do aço.

Para aprofundar o estudo sobre a influência da temperatura no tratamento térmico de revenido foi realizado um estudo comparativo do percentual de alívio de tensões, conforme apresentado na Figura 4 e na Tabela 7.

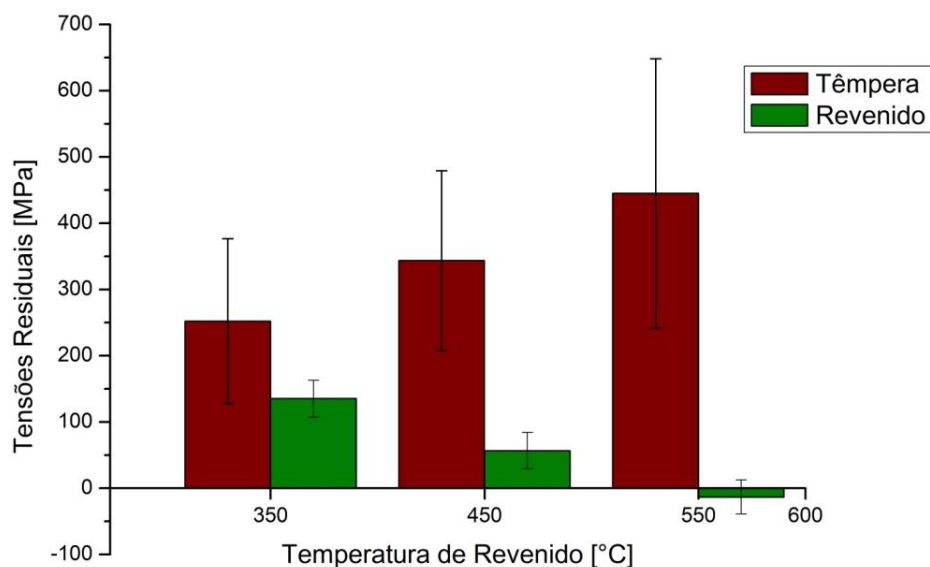


Figura 4 – Comparação do estado de tensões após a têmpera e após o revenido nas diferentes temperaturas de revenido.

Tabela 7 – Tensões residuais médias nas diferentes condições de tratamento térmico e percentual de redução de tensões para cada grupo.

Grupo	Tensões Residuais [MPa]		Redução (%)
	Temperado	Revenido	
A	252	135	46
B	343	57	83
C	445	-13	103

Os valores eficaz (RMS) calculados a partir das medições do RMB de cada amostra estão listados na Tabela 8. A média e o desvio padrão do RMB foram calculados para cada grupo e evidenciados na Figura 5, sendo possível observar que, com o aumento da temperatura de revenido, houve também um aumento no sinal RMB medido e que com o aumento da frequência de excitação ocorre também um aumento significativo no sinal RMB.

Tabela 8 - RMB nas diferentes condições de tratamentos térmicos para frequências de excitação de 10 Hz e 50 Hz.

Grupo	Amostra	RMS _{RMB} [mV]			RMS _{RMB} [mV]		
		Frequência de Excitação 10 Hz			Frequência de Excitação 50 Hz		
		Têmpera	Revenido		Têmpera	Revenido	
A	I	0,192	0,431	0,378 ± 0,046	0,407	0,665	0,607 ± 0,051
	II	0,143	0,358		0,339	0,585	
	III	0,134	0,345		0,329	0,571	
B	I	0,217	0,433	0,406 ± 0,024	0,426	0,649	0,617 ± 0,028
	II	0,207	0,392		0,428	0,596	
	III	0,178	0,392		0,37	0,605	
C	I	0,173	0,379	0,425 ± 0,042	0,377	0,622	0,659 ± 0,033
	II	0,208	0,434		0,458	0,668	
	III	0,273	0,461		0,541	0,686	

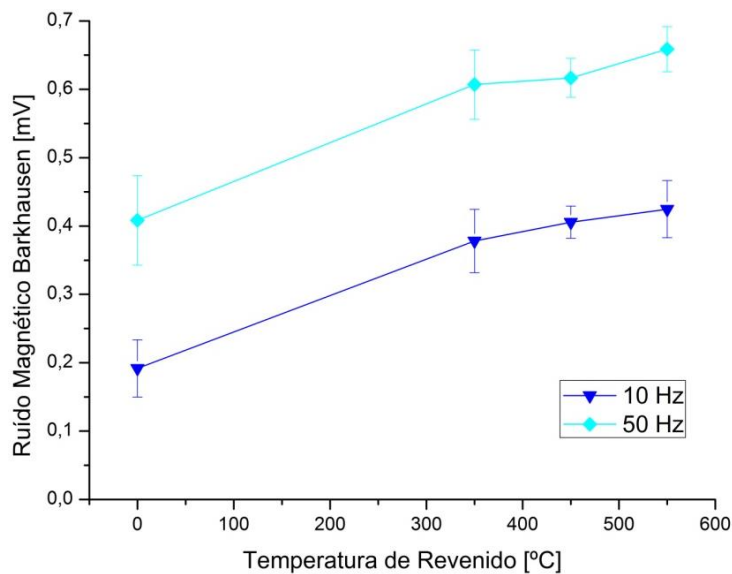


Figura 5 – Ruído magnético Barkhausen frequências de excitação de 10 Hz e 50 Hz.

Segundo Davut e Gür (2007) o aumento do RMB é proporcional ao aumento de temperatura de revenido devido ao aumento do deslocamento de paredes de domínio produzido pelo surgimento da martensita revenida, que é mais macia que a martensita não revenida obtida após a têmpera, o que está coerente com os resultados encontrados na análise do RMB.

Além disso, os resultados apresentados são coerentes com os descritos por Grijalba (2010), que obteve sinais de RMB maiores para frequências de excitação maiores. Isto acontece, pois o número de paredes de domínio e saltos por unidade de tempo aumentam com o aumento da frequência de excitação.

A Figura 6 apresenta um estudo comparativo das tensões residuais, ruído magnético Barkhausen e propriedades mecânicas do aço AISI 4340 com relação à temperatura de revenido.

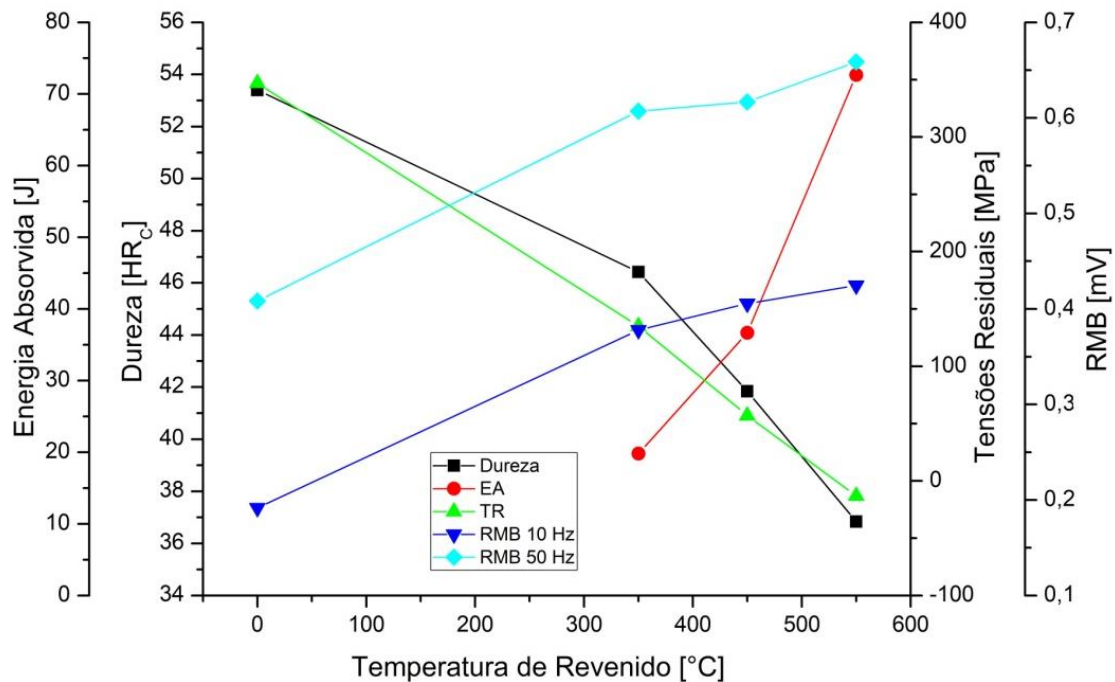


Figura 6 - Tensões residuais, dureza, energia absorvida e ruído magnético Barkhausen em função da temperatura de revenido.

Analisando a Figura 6 é possível observar que tanto as tensões residuais quanto a dureza do material são inversamente proporcionais ao aumento de temperatura de revenido, enquanto a tenacidade ao impacto Charpy apresenta aumento proporcional ao aumento da temperatura de revenido.

Segundo Farias (2005) o ruído magnético Barkhausen é sensível a alterações microestruturais e ao estado de tensões existente no material, o que justifica a variação dos valores de RMB medidos antes e após o revenido, que proporciona mudanças na microestrutura martensítica e alívio das tensões residuais.

Kaplan *et al.* (2007) demonstraram que os valores de RMB decrescem proporcionalmente ao aumento de dureza. Uma boa correlação entre o ruído magnético Barkhausen, dureza e fração volumétrica de martensita foi obtida a partir de seus estudos. O aumento do sinal RMB com a queda da dureza pode ser explicado pela facilidade de movimentação das paredes de domínios causada pelo amolecimento da microestrutura (menor quantidade de martensita não revenida).

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho, que teve como objetivo a avaliação do comportamento das tensões residuais e das propriedades mecânicas no tratamento térmico do aço AISI 4340, permitem as seguintes conclusões:

1. O tratamento térmico de revenido nas diferentes temperaturas proporcionou alívio de tensões, sendo mais significativo no grupo revenido a 550°C, que gerou tensões de natureza compressiva, o que é benéfico para a vida em fadiga do material.
2. O aumento da temperatura de revenido ocasionou a diminuição na dureza do material, o que reforça a influência expressiva da temperatura de revenimento nesta propriedade mecânica dos aços.
3. Temperaturas de revenido mais altas geraram sinais RMB mais altos, pois houve queda na dureza do material e conseqüente facilidade na movimentação das paredes dos domínios.
4. O aumento da temperatura de revenido promove maior tenacidade ao impacto ao material. O fenômeno de fragilização ao revenido pode ser observado nas amostras revenidas a 350°C e 450°C, enquanto nas amostras revenidas a 550°C há um aumento expressivo nos valores de energia absorvida durante realização dos ensaios de impacto.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPERJ pelo suporte financeiro, que permitiu a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASM (1991), Heat Treating. ASM International, vol. 4, Amsterdam.
- ASTM A829/A829M (2017), Standard Specification for Alloy Structural Steel Plates. ASTM International, 1-4.
- Bhadshia, H.K.D.H., Honeycomb, R. (2006), “*Steels: Microstructures and properties*”, 3ª ed., Elsevier, Amsterdam.
- Bin, H., Haiwen, L., Feng, Y., Han, D. (2017), Recent progress in medium-Mn steels made with new designing strategies, a review. *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 33, 1457-1464.
- Cindra Fonseca, M., Souza, M.F., Martins, M.C., Tomaz, I.V., Silveira, R.J.E. (2017), “Revisão teórica dos princípios da tensometria por difração de raios-X”, *VIII Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais*, Nova Friburgo.
- Davut, K., Gur, C.H. (2007), Monitoring the Microstructural Changes During Tempering of Quenched SAE 5140 Steel by Magnetic Barkhausen Noise. *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 26, 107-113.
- Farias, A.R. (2005), “*Caracterização do Ruído Magnético Barkhausen em Materiais Estruturais Utilizando Transformada Wavelet*”, Dissertação de Mestrado, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte.
- Grijalba, F.A.F. (2010), “*Desenvolvimento de Ensaio Não Destrutivo Baseado no Ruído Magnético de Barkhausen para Caracterização de Tensões Elásticas e Deformações Plásticas em Aços*”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Kaplan, M., Gür, C.H., Erdogan, M. (2007), Characterization of Dual-Phase Steels Using Magnetic Barkhausen Noise Technique. *Journal of Non-Destructive Evaluation*, vol 26, 79-87.
- Khan, P.L., Bhivane, S.V. (2018), Experimental Analysis and Investigation of Machining Parameters in Finish Hard Turning of AISI 4340 Steel. *Procedia Manufacturing*, vol. 20, 265-270.
- Kumar, S., Ghosh, P.K., Kumar, R. (2017), Surface modification of AISI 4340 steel by multi-pass TIG arcing process. *Journal of Materials Processing Tech* vol. 249, 394-406.
- Lee, S., Cho, K., Duffy, J., Chi, Y.C. (1989), The effects of tempering and test temperature on the dynamic fracture initiation behavior of an AISI 4340 VAR steel. *Materials Science and Engineering A*, vol. 114, 105-126.
- Materkowski, J.P., Krauss, G. (1979), Tempered Martensite Embrittlement in SAE 4340 Steel. *Metallurgical Transactions*, vol. 10, 1643-1651.

- Schulze, V., Vöhringer, O., Macherauch, E. (2010), “*Residual Stresses after Quenching*”, Quenching Theory and Technology”, 2^a ed., Taylor & Francis Group, Reino Unido.
- Serrão, F.L. (2014), “*Influência do Tratamento Térmico de Revenido nas Tensões Residuais e nas Propriedades Mecânicas do Aço AISI 4340*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- Totten, G.E. (2007), “*Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*”, 2^a ed., Taylor & Francis Group, Reino Unido.
- Withers, P.J., Bhadeshia, H.K.D.H. (2001), Residual stress. Part 1 – Measurement techniques. Materials Science and Technology, vol. 17, 355-365.
- Withers, P.J., Bhadeshia, H.K.D.H. (2001), Residual stress. Part 2 – Nature and origins. Materials Science and Technology, vol. 17, 366-375.

RESIDUAL STRESSES BEHAVIOUR IN THE HEAT TREATMENT OF AISI 4340 STEEL

Abstract. Heat treatments are essential in the industry, because they promote improvements in the mechanical and microstructural properties of steels, being applicable in the final product or in intermediate stages of the manufacturing process. The present work studied the behaviour of the residual stresses and the mechanical properties, such as hardness and impact toughness, of the AISI 4340 steel when quenched at 860°C in oil and tempered at different temperatures. The residual stresses were measured by X-ray diffraction using the $\sin^2\psi$ method and compared with the magnetic properties obtained by magnetic Barkhausen noise (MBN). After quenching, tensile residual stresses were found in all samples. The heat treatment of tempering caused stress relaxation at all temperatures studied, but remained trative in the samples tempered at 350°C and 450°C, becoming compressive only in the group tempered at 550°C. With the increase of the tempering temperature, a significant reduction in the material hardness was observed as opposed to the MBN and the impact toughness, which increased proportionally to the increase of the tempering temperature.

Keywords: AISI 4340 stel, Heat treatment, Residual stresses, Hardness, Impact toughness.