

Artigo Científico

ANÁLISE DA DUREZA DO AÇO ABNT 1524M EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE REVENIMENTO

Analysis of the Hardness of ABNT 1524M Steel as a Function of the Tempering Temperature

Isabelle Caroline Antunes de Souza^{1*}, Ernane Rodrigues da Silva¹, José Rubens Gonçalves Carneiro²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

²Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Submetido em: 30.11.2021; Aceito em: 26.07.2022; Publicado em: 28.10.2022.

***Autor para correspondência:** isabellecasouza@gmail.com

Resumo: O aço ABNT 1524M é um aço ligado, com baixo teor de carbono, cujo principal elemento de liga é o Mn, por isso este aço pode atingir elevados níveis de dureza e resistência mecânica, devido ao aumento da temperabilidade e endurecimento por solução sólida. Por ser um aço de fácil usinagem, ele é utilizado para fabricação de produtos forjados, onde é necessária a combinação de boa resistência mecânica, elevada soldabilidade e conformabilidade. O estudo dos tratamentos térmicos é de grande importância para o desenvolvimento de novas metodologias de produção industrial, pois permitem que processos já conhecidos tornem-se mais eficientes. Tendo em vista a ampla utilização industrial de aços temperados e revenidos, torna-se importante a avaliação do comportamento da dureza de um aço durante o processo de revenimento com a variação de temperatura. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a evolução da dureza do aço ABNT 1524M de acordo com a variação da temperatura de revenimento. Para a realização dos experimentos foram utilizadas barras de aço ABNT 1524M, que foram temperadas utilizando maçarico com resfriamento em água agitada e posteriormente revenidos por 1h em temperaturas variando de 200°C a 700°C. Foram realizados ensaios de dureza, utilizando a escala Rockwell C. Por fim uma análise estatística dos dados foi realizada com o auxílio do Minitab. Após o tratamento térmico de têmpera a dureza média encontrada foi de 54 ± 1 HRC. Após os revenimentos notou-se que a dureza do aço ABNT 1524M reduziu de acordo com a variação de temperatura devido ao alívio de tensões e à transformação de fases ocasionada pelo tratamento térmico, esta redução pode variar entre 3% ($T = 450^\circ\text{C}$) até 26% ($T = 400^\circ\text{C}$). Entretanto, através das análises do Minitab, verificou-se que não há uma nítida tendência de redução da dureza durante o revenimento, visto que no teste de igualdade de variâncias houve intercessão entre os intervalos analisados. A amostragem utilizada não apresentou outliers e os testes de igualdade de variâncias e médias demonstraram uma confiabilidade de 95%.

Abstract: SAE1524M is a low carbon alloy steel, whose main alloying element is manganese, allowing it to reach higher levels of toughness and mechanical resistance, due to the increase of hardenability solid solution hardening. Because it is an easily machined steel, SAE 1524M is used to manufacture forged products, where the combination of high mechanical resistance, weldability and conformability are necessary. The studies of thermal treatments are of great importance for the development of new industrial production methodologies, allowing known processes to become more efficient. Considering the large industrial use of quenched and tempered steels, the appraisal of toughness behavior during the temperature variation in tempering process becomes relevant. This paper aims at evaluating the evolution of toughness of SAE 1524 steel during temperature variation in tempering process. To implement these experiments SAE 1524M steel bars were quenched using a blowtorch, cooled with stirred water, and then tempered for 1 hour, in temperatures from 200°C to 700°C. Hardness tests were conducted using Rockwell C scale. In conclusion, a statistical analysis was done using a software. After the quenching heat treatment, the toughness measured was 54 ± 1 HRC. After tempering the toughness of the SAE 1524M steel lowered according to the temperature variation due to the stress relief and phase transformation, brought by the heat treatment, this reduction went from 3% ($T = 450^\circ\text{C}$) to 26% ($T = 400^\circ\text{C}$). But, through the software analysis, it was found that there was no clear tendency of hardness reduction during tempering, since during the test of equality of variances there was an intersection between the analyzed intervals. The sample used is valid according to Grubbs, t-Student and Fischer method, as there are no outliers, and the equality of variances and average tests show a reliability of 95%.

Palavras-chave: Têmpera. Revenimento. Dureza.

Keywords: Tempering. Quenching. Toughness

INTRODUÇÃO

Aços são ligas de ferro e carbono, cujo teor de carbono pode variar entre 0,008 e 2,11%. Além dos elementos residuais do processo de fabricação do aço, que não alteram as suas propriedades, elementos de liga podem ser adicionados com o intuito de melhorar as propriedades e/ou adequar as propriedades de um aço para determinada aplicação.

Os elementos de liga conferem aos aços aumento da dureza, melhoria da resistência mecânica, resistência à corrosão e ao desgaste, diminuição dos riscos de empenamento e fissuração, aumento da tenacidade e modificações das características elétricas e magnéticas, entre outras características. Os elementos de liga mais utilizados são Cr, Ni, Mo, W, Mn, Si e Cu, porém outros elementos também são utilizados em menor quantidade (SOUZA, 2018).

O aço ABNT 1524M é um aço liga que apresenta baixo teor de carbono, cujo principal elemento de liga é o manganês modificado ao nióbio (CHIAVERINI, 1979; PINTO, 2019). O aço ABNT 1524M é um aço carbono resulfurado, ou seja, é um aço de fácil usinagem, formulado para a utilização em produtos forjados onde é necessária a combinação de boa resistência mecânica, elevada soldabilidade e conformabilidade.

Devido ao fato de o manganês ser o principal elemento de liga, esse aço pode atingir elevados níveis de dureza e resistência mecânica, pois o Mn proporciona ao aço maior temperabilidade, além de possibilitar o endurecimento por solução sólida. Por ser um aço baixa liga e com baixo teor de carbono, o aço ABNT 1524M apresenta boa conformabilidade a quente devido a sua baixa temperatura de recristalização, que fica entorno de 730°C. A Tabela 1 apresenta a composição química do aço ABNT 1524M.

Tabela 1. Manual dos Aços Gerdau, 2003.

%C	%Mn	%P	%S
0,19 - 0,25	1,35 - 1,65	0,03	0,05

Fonte: Manual dos Aços Gerdau, 2003

A demanda pelo desenvolvimento de ligas e seu processamento crescem no mercado, devido a necessidade de boa qualidade e redução de custos no produto final. Outro fator importante, e que requer estudos, são os tratamentos térmicos aos quais esses aços são submetidos.

Tratamentos térmicos podem ser definidos como o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento as quais os aços são submetidos, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o intuito de alterar suas propriedades físicas e mecânicas ou conferir determinadas características. Os tratamentos térmicos alteram a microestrutura dos aços, e como as propriedades dos aços dependem basicamente de sua microestrutura, quando esta é modificada tem-se como resultado a alteração das propriedades dos aços. Neste trabalho trataremos dos tratamentos térmicos de tempera e revenimento.

O tratamento térmico de têmpera consiste em aquecer um aço até a sua temperatura de austenitização e em seguida resfriá-lo de maneira brusca (Maia, 2010). O principal intuito da têmpera é a obtenção de uma microestrutura martensítica, a qual confere ao aço dureza e resistência (Penha, 2010). A microestrutura martensítica é desejada pois esta confere ao aço aumento do limite de resistência e dureza, mas por outro lado, este processo reduz a ductilidade e a tenacidade do aço, além de ocasionar tensões internas (CHIAVERINI, 1988).

O tratamento térmico de revenimento é utilizado para diversos fins, dependendo basicamente da composição química do aço e sua aplicação. Geralmente, o revenimento é utilizado após a têmpera com o intuito de aumentar a tenacidade e a ductilidade do aço (GRACIOSO, 2003). Utiliza-se o revenimento para melhorar a combinação de dureza e tenacidade do material após a têmpera (NETO, 2017).

O revenimento pode ser descrito como uma transformação de fases difusional, de um estado metaestável constituído de martensita, para o estado de equilíbrio constituído de ferrita e carbonetos (NORO; GORNI, 2009). O tratamento térmico de revenimento consiste em um processo onde o aço temperado ou normalizado é aquecido a uma temperatura abaixo da temperatura de austenitização e posteriormente é resfriado ao ar (CASTRO, 2007).

O processo de revenimento corrige a fragilidade e as tensões internas resultantes no aço após a têmpera. A soma dos fatores tempo, temperatura e composição química determinam as propriedades mecânicas do aço temperado e revenido (CORRÊA; SAMPAIO; BRAGA, 2015). De acordo com Wan, Xiong e Suo (2005) o processo de revenimento se faz necessário para melhorar as propriedades mecânicas e aliviar as tensões do aço temperado. A Figura 1 mostra um diagrama esquemático dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

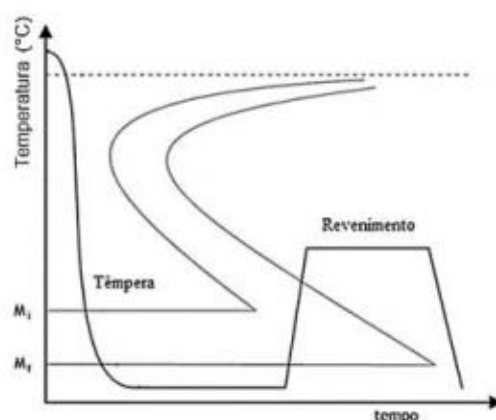


Figura 1. Esquema dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Fonte: Silva (2018). Adaptado de Costa e Mei (2010).

Durante o revenimento, a martensita que possui estrutura TCC perde o excesso de carbono em solução e sua estrutura cristalina torna-se ferrita, sem distorções e sem o acúmulo de tensões mecânicas. Na Figura 2, nota-se que em aços baixa liga e com alta resistência, a dureza diminui de acordo com o aumento da temperatura de revenimento.

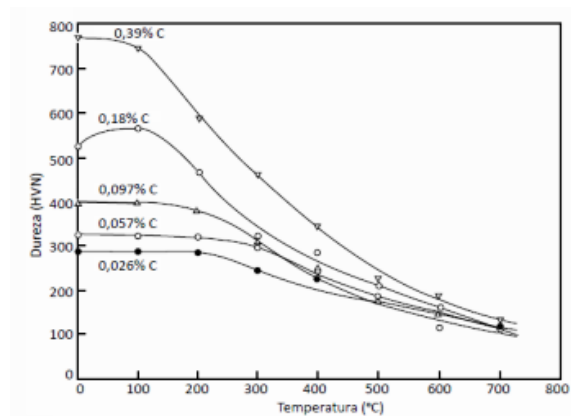


Figura 2. Relação da dureza com a temperatura de revenimento para aços baixa liga com elevada Fonte: Mundos dos Aços Especiais – Gerdau.

O presente trabalho tem por objetivo fazer uma análise estatística da evolução da dureza do aço ABNT 1524M de acordo com a variação da temperatura de revenimento.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o presente estudo foram utilizadas barras circulares de aço ABNT 1524M, oriundas de um processo de lingotamento contínuo e forjamento em matriz aberta, com diâmetros de 278 mm e 298 mm. As barras circulares foram cortadas em discos de 30 mm e 10 mm de espessura, utilizando serra de fita. Em seguida os discos foram cortados extraindo pastilhas com 12 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento, que passaram pelos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

Inicialmente as amostras foram temperadas utilizando o aquecimento por maçarico e resfriamento em água com agitação. Este procedimento foi utilizado devido ao tamanho das amostras, pois como o diâmetro das amostras era pequeno ao realizar este procedimento garantiu-se uma taxa de resfriamento elevada e uniforme em todo o material, fazendo com que as amostras fossem completamente temperadas. Posteriormente foi realizada a medição da dureza HRC das amostras temperadas e logo em seguida realizou-se o tratamento térmico de revenimento e novamente a dureza das amostras foi medida.

Para realizar o revenimento as amostras foram aquecidas em fornos do tipo mufla, resistivos e equipados com microcontrolador e termopar do tipo K. As amostras foram aquecidas a temperaturas entre 200°C e 700°C, e mantidas nestas temperaturas durante 1 hora. Optou-se por utilizar estas temperaturas de revenimento devido ao fato destas faixas de temperaturas serem utilizadas por Wan, Xiong e Suo (2005) para traçar as curvas de revenimento durante a sua análise do modelo matemático de revenimento proposto Hollomon-Jaffe.

Após os tratamentos térmicos de tempera e revenimento as amostras foram preparadas para realizar a medição de dureza. Para medição de dureza utilizou-se a escala Rockwell C, com pré-carga de 10kgf e carga de 150kgf. Para cada faixa de temperatura utilizou-se uma amostra do aço ABNT 1524M. Para cada amostra foram realizadas 5 medições de dureza.

Através dos dados de dureza obtidos após os tratamentos térmicos de tempera e revenimento, e com o auxílio do software Minitab, realizou-se a análise estatística da evolução da dureza de acordo com a variação da temperatura de revenimento durante 1h. A análise estatística baseou-se em testes de outliers pelos métodos de Grubbs, t-Student e Fischer, teste de normalidade, testes de igualdade de variâncias e médias.

O método de Grubbs consiste em calcular a razão entre a diferença de cada ponto analisado com a média de todos os resultados em relação ao desvio padrão. Neste método um valor é considerado um outlier quando o valor de G encontrado é maior que o $G_{crítico}$. O método de t-Student é utilizada em situações onde a quantidade de dados é pequena e desvio padrão não é conhecido. O método de Fischer é baseado na análise de variância entre a amostragem analisada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realizar o tratamento térmico de tempera obteve-se os seguintes resultados de dureza do aço ABNT 1524M (Tabela 2).

Tabela 2. Dados de dureza do aço ABNT 1524M após tempera

Material	Aço ABNT 1524M											
Dureza após tempera (HRC)	52	54	53	54	55	54	56	54	54	54	53	53

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 3 apresenta os dados estatísticos básicos de dureza do aço ABNT 1524M após o tratamento térmico de tempera. Nota-se que a dureza média do aço após a tempera é de 54 ± 1 HRC. A dureza elevada se deve à transformação martensítica que ocorreu durante o processo de tempera.

Tabela 3. Dados estatísticos da dureza do aço ABNT 1524M após revenimento obtidos com o auxílio do Minitab.

Variável	Nº de Amostras	Média	Desvio Padrão
Dureza Após Têmpera	12	53,833	1,030

Fonte: Elaborado pelo autor

Durante o processo de têmpera ocorre o acúmulo de tensões internas, que serão aliviadas utilizando o tratamento térmico de revenimento.

Analisando a Tabela 4 e o Gráfico 1, nota-se que após o revenimento todos os valores de dureza encontrados são inferiores ao valor de dureza encontrado logo após a têmpera, mostrando que o tratamento térmico de têmpera foi efetivo, pois a sua função é reduzir as tensões internas e amolecer o material. É possível verificar também que a medida que a temperatura de revenimento aumenta a dureza reduz. Isto ocorre devido ao aumento da mobilidade atômica do aço, o que leva à diminuição do número de defeitos internos e ao surgimento de fases mais estáveis e mais dúcteis no material, este fenômeno é ocasionado pelo tratamento térmico de revenimento e às transformações de fases.

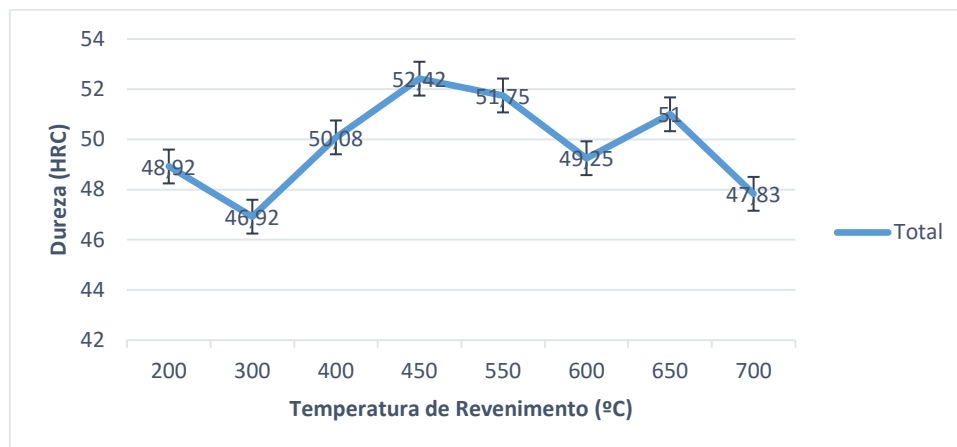
Tabela 4. Dados estatísticos da dureza do aço SAE 1524M em função da temperatura de revenimento obtidos com o auxílio do Minitab.

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
200,00	12	0	48,917	0,866	2,999	42,000	48,000	49,500	50,750	53,000
300,00	12	0	46,92	2,23	7,73	26,00	46,50	49,00	51,75	54,00
400,00	12	0	50,083	0,866	2,999	44,000	48,250	50,000	52,750	54,000
450,00	12	0	52,42	1,55	5,38	47,00	49,00	52,00	53,00	67,00
550,00	12	0	51,75	1,60	5,55	45,00	49,00	50,50	51,75	66,00
600,00	12	0	49,250	0,411	1,422	46,000	48,250	49,500	50,000	51,000
650,00	12	0	51,000	0,674	2,335	46,000	50,250	51,500	53,000	53,000
700,00	12	0	47,83	1,32	4,59	40,00	44,00	49,00	51,50	54,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 1. Dureza Média Após 1h de Revenimento (HRC) x Temperatura de Revenimento (°C)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Utilizando o *Minitab* realizou-se o teste de *outlier*. *Outliers* são pontos que podem gerar erros em uma análise estatística. A Tabela 5 apresenta o teste de *outlier* gerado pelo *software Minitab*, nota-se que os pontos gerados por 3 temperaturas de revenimentos podem ter grau *outliers*, estas temperaturas são 300°C (ponto 26 HRC), 450°C (ponto 67 HRC) e 550° (ponto 66 HRC). Na tabela 5, G representa o valor encontrado para o teste de Grubbs e P o nível de significância.

Tabela 5. Teste de Outlier - Minitab

Teste de Outlier: 200,00; 300,00; 400,00; 450,00; 550,00; ... 0,00; 700,00

Método

Hipótese nula Todos os valores de dados são provenientes da mesma população normal
 Hipótese alternativa O menor ou o maior valor dos dados é um outlier
 Nível de significância $\alpha = 0,05$

Teste de Grubbs

Variável	N	Média	DesvPad	Mín	Máx	G	P
200,00	12	48,917	2,999	42,000	53,000	2,31	0,090
300,00	12	46,92	7,73	26,00	54,00	2,71	0,005
400,00	12	50,083	2,999	44,000	54,000	2,03	0,304
450,00	12	52,42	5,38	47,00	67,00	2,71	0,005
550,00	12	51,75	5,55	45,00	66,00	2,57	0,017
600,00	12	49,250	1,422	46,000	51,000	2,29	0,100
650,00	12	51,000	2,335	46,000	53,000	2,14	0,194
700,00	12	47,83	4,59	40,00	54,00	1,71	0,858

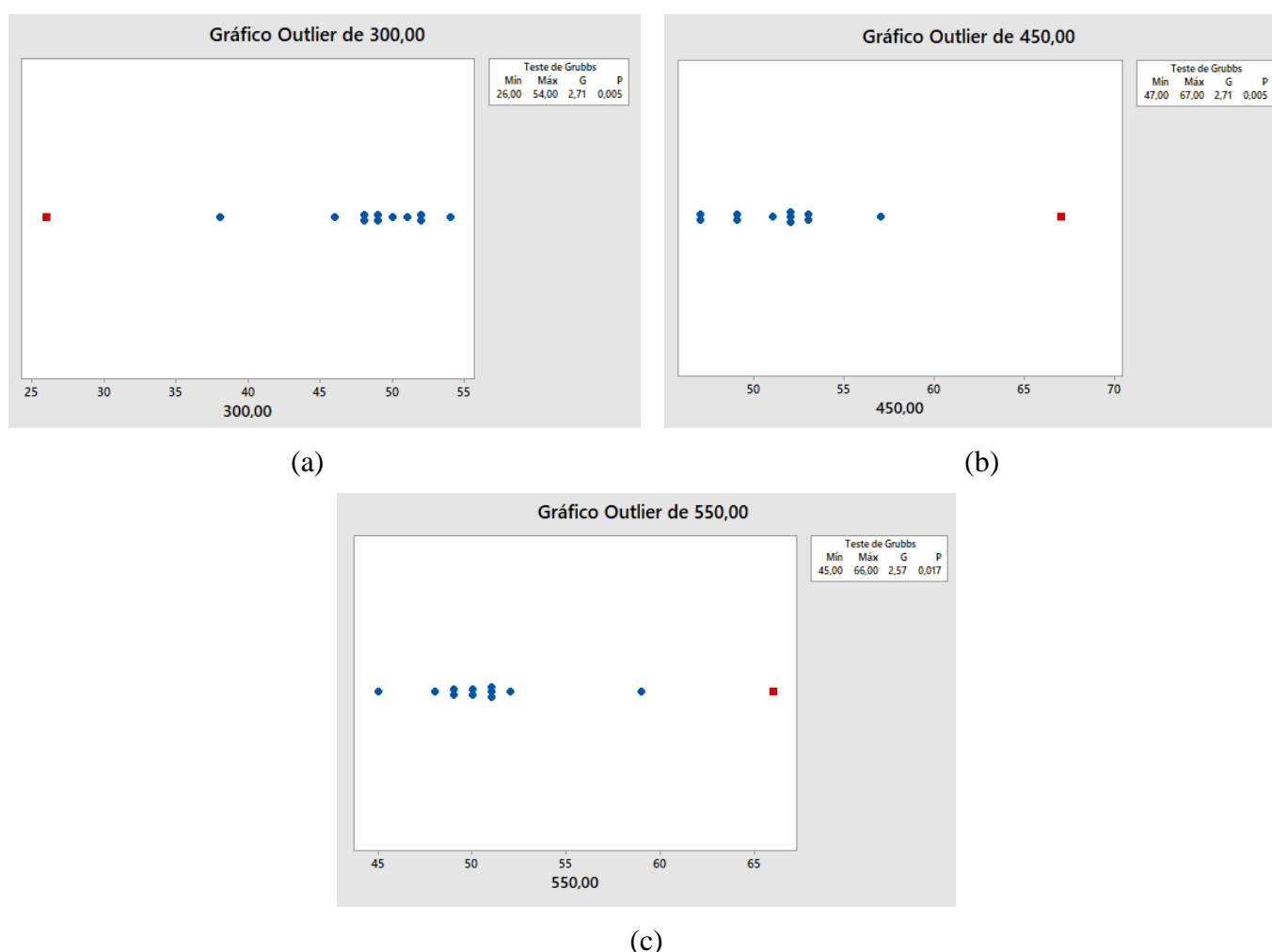
Outlier

Variável	Linha	Outlier
300,00	10	26
450,00	8	67
550,00	6	66

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Gráficos 2 (a, b e c) apresentam os dados do teste de *outlier* gerados pelo *Minitab*. O *software Minitab* utiliza o método de Grubbs para realizar a análise de *outliers*, este método considera que o *outlier* seja apenas o ponto de maior ou menor valor, logo, este método não é suficiente para afirmar se há ou não um ponto duvidoso na amostragem. Neste estudo os pontos considerados *outliers* pelo método de Grubbs são 26HRC a 300°C, 67HRC a 450°C e 66HRC a 550°C, pois eles são o maior e o menor valor de dureza encontrados, respectivamente e apresentam valor de P inferior ao nível de significância utilizado para análise ($\alpha=0,05$).

Gráfico 2. Gráficos de outlier de (a) 300°C; (b) 450°C; (c) 550°C



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para validar a análise de *outliers* realizaram-se análises pelos métodos de distribuição *t-Student* e *Fischer*. Os resultados destas análises encontram-se na Tabela 6. Realizando a análise pelos métodos *t-Student* e *Fischer* verificou-se-se que não há *outliers* entre os dados analisados, pois em todas as situações analisadas utilizando o a distribuição *t-Student* encontrou-se intercessão entre os intervalos e nas análises pela distribuição *Fischer* o valor de F encontra-se dentro do intervalo de variância.

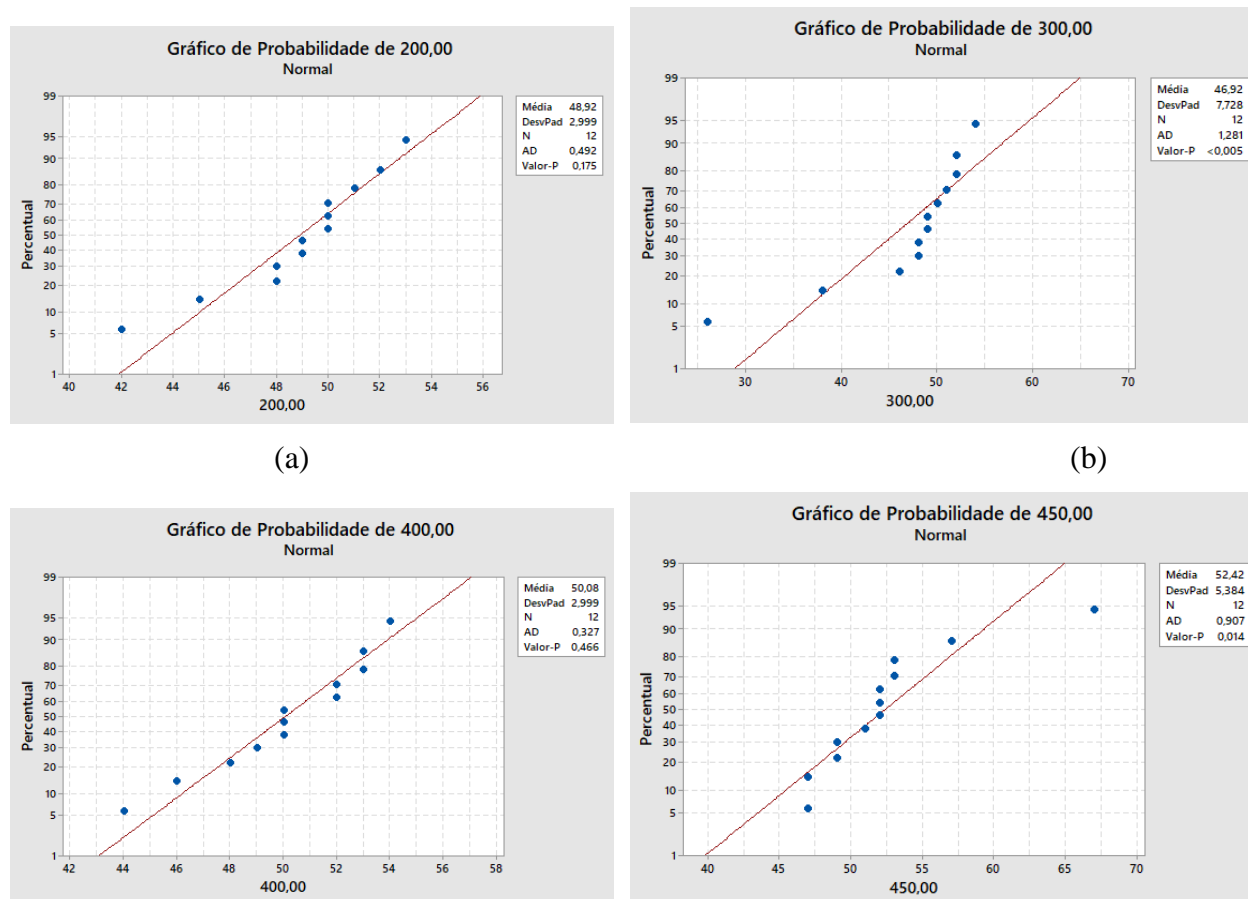
Tabela 6. Resultado dos Testes de *Outliers* Utilizando os Métodos de Distribuição *t-Student* e Fischer.

T = 300°C	T = 450°C	T = 550°C
<p>Ponto duvidoso : 26 HRC - Análise pela distribuição t-Student: Com ponto duvidoso: $42,01 < \mu x < 51,83$ HRC Sem ponto duvidoso: $45,97 < \mu x < 51,67$ HRC</p> <p>- Análise pela distribuição Fischer: $F = 59,72/48,82 = 1,22$ Intervalo de variância: $0,284 < Sx2/Sy2 < 3,665$</p>	<p>Ponto duvidoso: 67 HRC - Análise pela distribuição t-Student: Com ponto duvidoso: $49,00 < \mu x < 55,84$ HRC Sem ponto duvidoso: $49,11 < \mu x < 53,07$ HRC</p> <p>- Análise pela distribuição Fischer: $F = 28,99/8,69 = 3,34$ Intervalo de variância: $0,284 < Sx2/Sy2 < 3,655$</p>	<p>Ponto duvidoso: 66 HRC - Análise pela distribuição t-Student: Com ponto duvidoso: $49,22 < \mu x < 55,28$ HRC Sem ponto duvidoso: $48,15 < \mu x < 52,75$ HRC</p> <p>- Análise pela distribuição Fischer: $F = 30,75/11,67 = 2,63$ Intervalo de variância: $0,284 < Sx2/Sy2 < 3,655$</p>

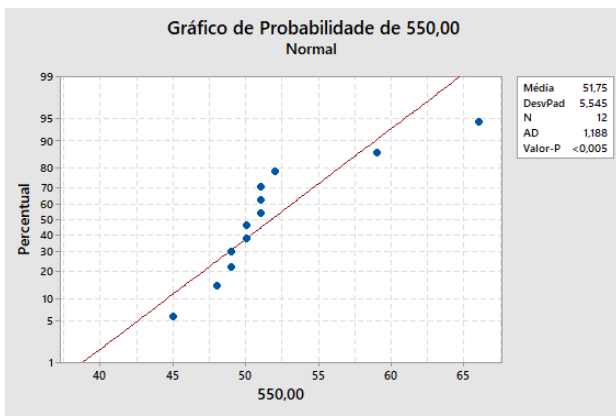
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Gráficos 3 (a, b, c, d, e, f, g, h) apresentam os resultados do teste de normalidade das medições de dureza de acordo com a variação de temperatura. O teste foi realizado com o auxílio do *Minitab*. De acordo com este teste apenas as temperaturas de 300°C (Gráfico 3b) e 550°C (Gráfico 3e) não obedeceram a distribuição normal, pode-se constatar isto devido ao desvio de linearidade nos gráficos analisados e os valores de P encontrados.

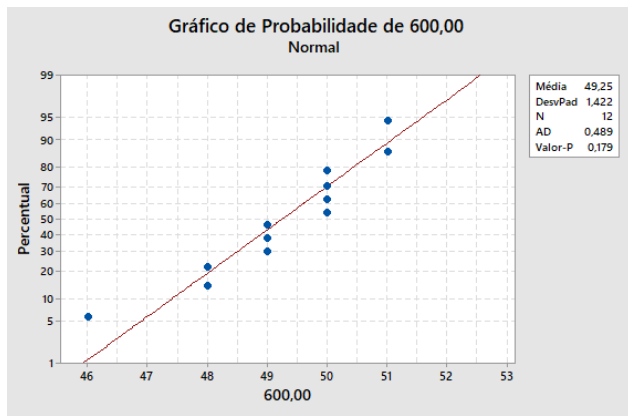
Gráfico 3. Gráfico de Probabilidade Normal (a) 200°C; (b) 300°C; (c) 400°C; (d) 450°C; (e) 550°C; (f) 600°C; (g) 650°C; (h) 700°C.



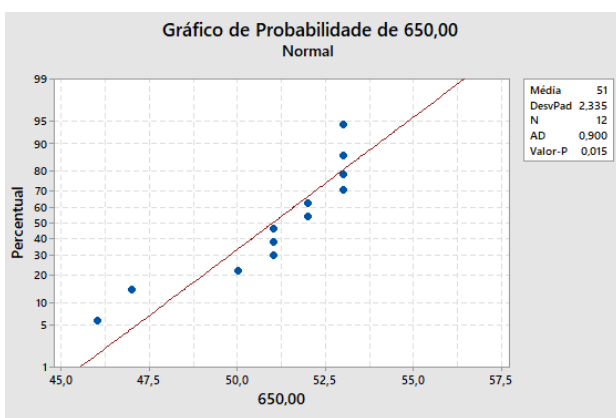
(c)



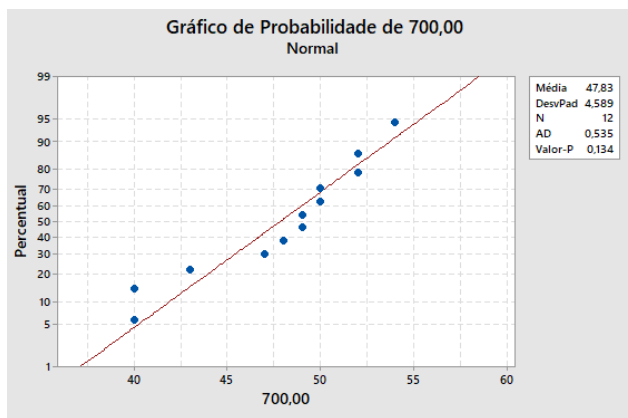
(d)



(e)



(f)



(g)

(h)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os testes de igualdade de variâncias e média realizados com o auxílio do *Minitab* demonstraram com 95% de confiança que há igualdade entre os dados coletados pois, o valor de P encontrado ($P = 0,159$) é maior que o nível de significância utilizado, isto torna a amostragem confiável. Os resultados dos testes de igualdade de variância realizados através da análise dos intervalos de confiança (IC) podem ser vistos na Tabela 7 e no Gráfico 3, já o teste de médias encontra-se Tabela 8.

Tabela 7. Teste de Igualdade de Variâncias

Teste de igualdade de variâncias: 200,00; 300,00; 400,00; ... ,00; 700,00

Método

Hipótese nula Todas as variâncias são iguais
 Hipótese alternativa No mínimo uma variância é diferente
 Nível de significância $\alpha = 0,05$

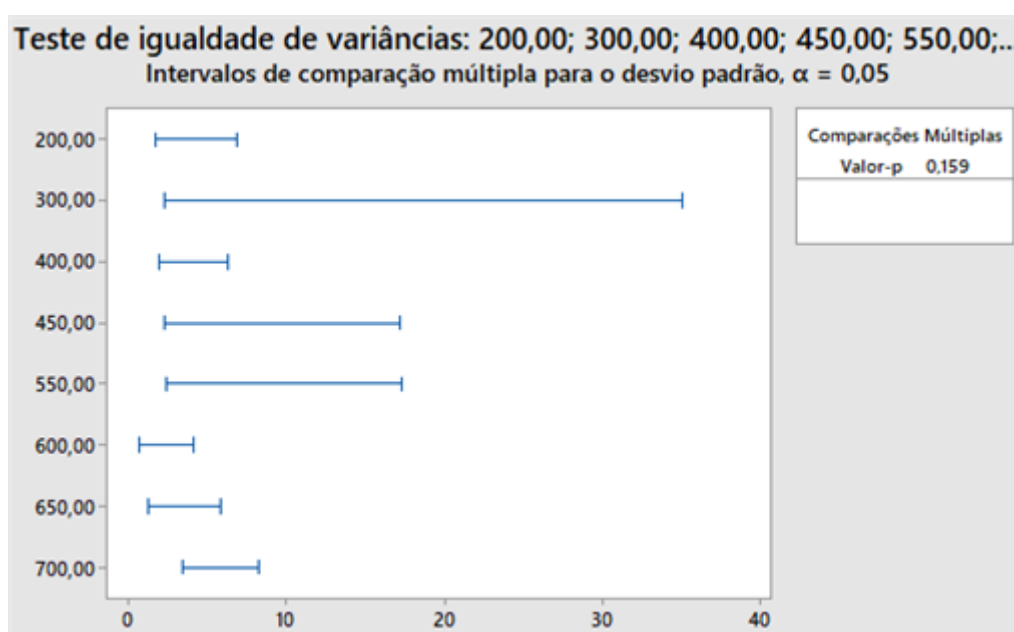
Intervalos de 95% de Confiança Bonferroni para os Desvios Padrão

Amostra	N	DesvPad	IC
200,00	12	2,99874	(1,23800; 9,4073)
300,00	12	7,72785	(2,00745; 38,5282)
400,00	12	2,99874	(1,52167; 7,6535)
450,00	12	5,38446	(1,57508; 23,8391)
550,00	12	5,54527	(1,67349; 23,7974)
600,00	12	1,42223	(0,64579; 4,0565)
650,00	12	2,33550	(0,89006; 7,9368)
700,00	12	4,58918	(2,41100; 11,3131)

Nível de confiança individual = 99,375%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3. Teste de Igualdade de Variâncias



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8. Análise de Médias - Teste T para Duas Amostras

Amostras Analisadas		300 °C e 600 °C	200 °C e 700 °C
Estimativa da Diferença	Diferença	-2,33	1,08
	Desvio Padrão Combinado	5,56	3,88
	IC de 95% para a Diferença	(-7,04;2,37)	(-2,20;4,37)
Teste Hipótese Nula - H_0 : $\mu_1 - \mu_2 = 0$ Hipótese Alternativa - H_1 : $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$	Valor-T	-1,03	0,68
	GL	22	22
	Valor-p	0.315	0,501

Fonte: Elaborado pelo autor

CONCLUSÃO

Após as análises realizadas verificou-se que houve redução na dureza do aço ABNT 1524M após o revenimento considerando a variação de temperaturas, esta redução pode variar entre 3% ($T = 450^\circ\text{C}$) até 26% ($T = 400^\circ\text{C}$). A redução de dureza era esperada, uma vez que o tratamento térmico de revenimento é utilizado após a têmpera para aliviar as tensões internas do material, melhorando suas propriedades mecânicas. Tal fato ocorre porque durante o revenimento, a martensita perde o excesso de carbono em solução e sua estrutura cristalina torna-se ferrita, com um nível menor de distorções e acúmulo de tensões mecânicas. Entretanto, através das análises do *Minitab*, verificou-se que não há uma nítida tendência de redução da dureza durante o revenimento, visto que no teste de igualdade de variâncias houve intercessão entre os intervalos analisados.

A amostragem utilizada não apresentou *outliers* e os testes de igualdade de variâncias e médias demonstraram uma confiabilidade de 95%.

Para a obtenção de resultados mais precisos sugere-se a realização dos testes em tempos e temperaturas variados de revenimento, com a realização de duplicatas e triplicatas para cada faixa de tempo e temperatura analisado.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG pelo espaço cedido e apoio ao desenvolvimento da pesquisa. À PUC Minas pela disponibilidade de utilização de laboratórios.

REFERÊNCIAS

- CASTRO DBV. **Influência da Temperatura de Austenitização para Têmpera e de Revenimento na Tenacidade e na Vida em Fadiga do Aço SAE 5160 com Diferentes Teores de Fósforo**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 168 p. 2007.
- CHIAVERINI V. **Aços e Ferros Fundidos**. ABM, 6ª ed., São Paulo, 1988.
- CHIAVERINI V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica; Volume III**. McGraw-Hill, 2ª ed., São Paulo, 1979.
- CORRÊA RS; SAMPAIO PT; BRAGA AP. Modelagem das propriedades mecânicas de tubos de aço, utilizando redes neurais artificiais. **19º Seminário de Automação & TI Industrial, Rio de Janeiro**, 43 – 51, 2015.
- COSTA ALV; MEI PR. **Aços e Ligas Especiais**. Editora Edgard Blücher, 2ª ed., São Paulo, 2006.
- GERDAU AÇOS FINOS PIRATINI. **Manual de Aços**. Edição atualizada 2003.

- GRACIOSO JFF. **Efeito das condições de tempera na microestrutura e propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico CA6NM.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 129 p., 2003.
- MAIA DM. **Levantamento da cinética de revenimento de um aço – carbono ligado ao V, B, Cr, Ni e Mo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 90 p. 2010.
- NETO PVR. **Análise do revenimento nas propriedades mecânicas e microestruturais do ferro fundido nodular austemperado com matriz ferrítica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 128 p. 2017.
- NORO MRF; GORNI AA. O uso do parâmetro de revenimento no tratamento térmico de chapas grossas na Usiminas - Cubatão. **46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos**, Santos, 2009.
- PENHA RN. **Modelagem do processo de revenimento por redes neurais.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 151 p., 2010.
- PINTO LA. *et al.*. Estudo comparativo de identificação e quantificação de austenite retida em aço Trip por difração de raio-X e difração de elétrons retroespalhados. **74º Congresso Anual da ABM – Internacional**. São Paulo, 2019.
- SOUZA SA. **Composição química dos aços.** Editora Edgard Blücher Ltda, 5ª reimpressão, São Paulo, 2018.
- WAN N, XIONG W, SUO J. Mathematical Model for Tempering Time Effect on Quenched Steel Based on Hollomon Parameter. **Journal of Materials Science and Technology** **21**(6), 803 - 806, 2005.

