



Artigo

## Determinação da taxa de resfriamento de diferentes meios de extração de calor e a influência sobre a dureza do aço ABNT 8620.

Aline Vitória Maia de Oliveira <sup>[1]</sup>, Francisco Edson N. Fraga <sup>[2]</sup> e Liliane F. A. de Almada <sup>[3]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; alinnemaia@hotmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; nfraga@ufersa.com.br

<sup>[3]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; almadalily@gmail.com

*Recebido:* 06/07/2020;

*Aceito:* 09/08/2020;

*Publicado:* 11/09/2020.

**Resumo:** O meio e taxa de resfriamento do aço a partir da sua temperatura austenítica influencia na microestrutura e propriedades mecânicas resultantes. O estudo sobre as taxas dos meios de resfriamento ainda é precária na literatura, fazendo-se necessário o seu estudo. No presente trabalho foram realizadas extrações de calor no aço ABNT/SAE 8620 a partir da sua temperatura de austenitização, em meios de água, salmoura e ar agitados moderadamente e severamente. A partir das curvas de resfriamento verificou-se que a agitação do meio de extração de calor tem influência na severidade dos mesmos, e que a salmoura e água agitadas severamente extraíram calor no mesmo intervalo de tempo, com diferentes taxas de resfriamento, sendo a água a maior delas, com taxa máxima de resfriamento obtida de 221,25°C/s a temperatura aproximada de 180°C. Em contrapartida, as durezas obtidas para os meios mais severos apesar de próximas, a salmoura agitada severamente possibilitou obter uma maior dureza média, que foi de 60,2 HRC. Com o presente trabalho foi possível, portanto, obter de forma satisfatória as curvas e taxas de resfriamento para ar, água e salmoura quando submetidos a condições de agitações moderadas e severas, para serem utilizadas em tratamentos térmicos por resfriamento contínuo.

**Palavras-chave:** taxa de resfriamento; extração de calor; aço ABNT 8620.

**Abstract:** Cooling rate of steel from its austenitic temperature influences the microstructure and resulting mechanical properties. The study on cooling media rates is still poor in the literature, making it necessary to study it. In the present work, heat extractions were carried out on ABNT/SAE 8620 steel from its austenitization temperature, in moderately and severely agitated water, brine and air media. From the cooling curves, it was verified that the agitation of the heat extraction medium has an influence on their severity, and that the stirred brine and water severely extracted heat in the same time interval, with different cooling rates, being water the largest one, with a maximum cooling rate of 221,25 °C/s at a temperature of approximately 180 °C. On the other hand, the hardness obtained for the most severe media, despite being close, the severely stirred brine made it possible to obtain a higher average hardness, which was 60,2 HRC. The present work was therefore possible to obtain satisfactorily the cooling curves and rates for air, water and brine when subjected to conditions of moderate and severe agitation, to be used in heat treatments by continuous cooling.

**Key-words:** cooling rate; heat extraction; ABNT steel 8620

## 1. INTRODUÇÃO

As taxas e meios de resfriamento em que o aço é submetido têm relação direta com as microestruturas e propriedades mecânicas associadas. O conhecimento destas taxas permite prever e controlar essas propriedades. O resfriamento do aço tem como objetivo alterar sua microestrutura, partindo de uma matriz de transformação austenítica, e resfriando continuamente. Espera-se normalmente após esse processo, o aumento de dureza [1]. Alterando o meio de resfriamento para uma mesma peça, é possível compará-lo em relação à quantidade de calor extraído (severidade), microestrutura e dureza obtidos em cada um, selecionando aquele que mais se adequa as condições de serviço desejada [2]. O resfriamento inadequado da peça pode provocar modificações nas propriedades, tensões e distorções que comprometam ou até inviabilizem a aplicação [3].

No contexto de aplicação e desempenho dos aços, o aço ABNT/SAE 8620 é um aço baixa liga normalmente utilizado após o processo de cementação que, após este e tratamento térmico posterior, obtêm uma elevada dureza superficial que confere uma maior resistência ao desgaste e resistência a fadiga. Aplica-se para fabricação de componentes mecânicos onde se faz necessário uma alta dureza superficial, tais como, eixo de comando de válvulas, coroas, engrenagens, pinos de pistão, etc [4]. Após o processo de cementação, o grau de deformação proveniente de tensões residuais aumenta e sua composição química é alterada em função do carbono a ele adicionado [5].

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo analisar as taxas de resfriamento e durezas obtidas em diferentes meios de extração de calor sendo eles, água, salmoura e ar quando submetidos a agitações moderadas e severas, fazendo uma analogia ao processo prático, o resfriamento ocorrerá de forma contínua para um aço ABNT/SAE 8620 sem tratamento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos foi utilizada uma barra circular do aço ABNT/SAE 8620 como obtido de fábrica, sem tratamentos de têmpera ou cementação, com diâmetro de 31,75 mm. Por conveniência, a barra de aço foi seccionada para a confecção dos corpos de prova, em seis corpos de prova de 15 mm de espessura. Em seguida realizaram-se furos no centro da espessura do disco com diâmetros de 1,59 e 15,88 mm de profundidade para a inserção do termopar, no intuito de registrar a temperatura no centro da peça. Um furo passante foi realizado na face da peça, de modo que ficasse à lateral do termopar, para a introdução de um arame de aço que auxiliou na movimentação do corpo de prova durante os processos de aquecimento e resfriamento. A representação do corpo de prova é esquematizada na Figura 1. Para a aquisição de dados utilizou-se a plataforma Arduino® de placa microcontroladora UNO, juntamente com o módulo MAX6675 e termopar tipo K para leituras de temperaturas e registro da taxa de resfriamento que foram posteriormente salvos em uma planilha eletrônica.

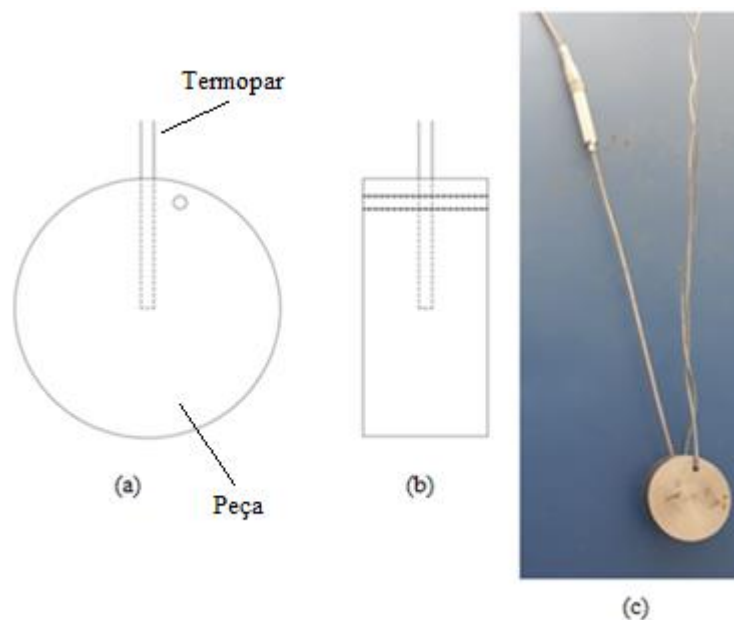


FIGURA 1. Representação esquemática do corpo de prova (a) Vista frontal, (b) Vista lateral, (c) Corpo de prova preparado para análise. (Autoria própria)

Depois de preparados, os corpos de prova foram submetidos, um por vez, aos processos de aquecimento em forno e resfriamento contínuo em diferentes meios de extração de calor, como segue. O aquecimento foi realizado utilizando um forno modelo 07120 da fabricante JUNG, onde o aço foi aquecido até que a temperatura em seu centro, indicada pelo termopar, fosse de aproximadamente 40°C acima da temperatura de autenitização, no caso 890°C. A transferência do forno para o meio de extração ocorreu de modo que, a perda de calor para o ambiente não fosse suficiente para haver mudança microestrutural e o corpo de prova estivesse acima da temperatura austenítica quando inserido no meio de extração de calor.

O resfriamento por meio da agitação moderada da peça foi realizado com frequência aproximada de uma rotação por segundo, a agitação severa em meio líquido ocorreu à frequência aproximada de três rotações por segundo e em meio gasoso fez-se o uso de um fluxo de ar. O resfriamento foi interrompido, quando em cada meio, a peça atingiu 50°C. O resfriamento em meio gasoso, ar, ocorreu à temperatura ambiente de 29°C. Para o resfriamento em meio líquido, água e salmoura, foi empregado um béquer no qual o volume de fluido fosse suficiente para permitir uma extração de calor mais eficaz, 1600 ml, e temperatura de 28°C. A solução de salmoura foi preparada utilizando 10% de NaCl.

Os corpos de prova tratados foram preparados metalograficamente até a lixa 600 para garantir acabamento superficial para medições de dureza, que foi realizada seguindo a norma ASTM E18-19, na qual foram realizadas seis medições para cada parte frontal do corpo de prova, o durômetro utilizado foi o Mitutoyo®HR-300. Os maiores valores de durezas obtidos nos meios de extração de calor foram comparados entre si e com este mesmo aço sem nenhum tratamento de têmpera ou cementação.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Resfriamentos

O Gráfico 1 mostra as curvas de resfriamento obtidas experimentalmente utilizando ar como meio de extração de calor. Observa-se que a agitação moderada da peça no meio leva cerca de 992 segundos (16 minutos) para a mesma sair da temperatura de 875°C e atingir 50°C, enquanto a agitação severa da peça no meio leva em torno de 480 segundos (8 minutos) para atingir a mesma temperatura.

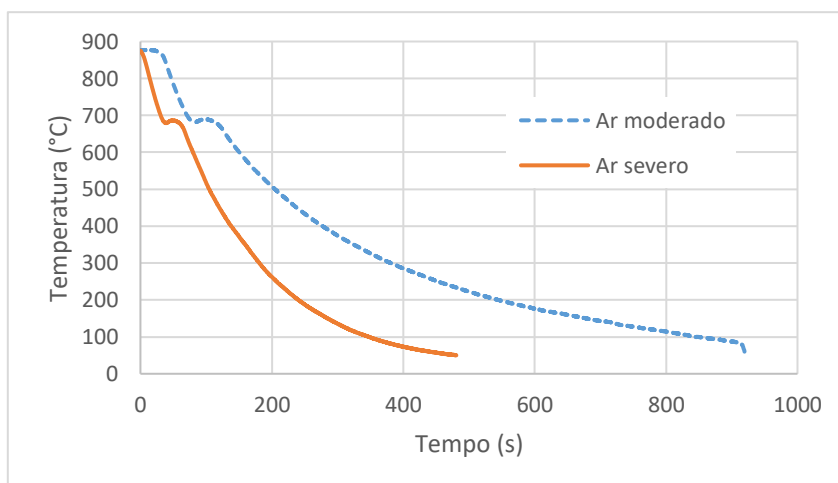


GRÁFICO 1. Curva de resfriamento em ar agitado moderadamente e severamente. (Autoria própria)

O comportamento das curvas para o resfriamento em ar se diferencia do comportamento dos demais devido a variação de temperatura entre as leituras serem muito pequenas, de modo que as taxas obtidas são muito baixas, tornando-o ilegível para o artigo. Assim foram exibidas no Gráfico 2 apenas o comportamento das maiores taxas de resfriamento obtida nesse meio. Observa-se que máxima taxa de resfriamento obtida para a agitação moderada da peça no ar foi de 8,75°C/s ocorrendo a uma temperatura de 815,20°C. A agitação severa da peça através do fluxo de ar proporciona uma maior taxa de resfriamento, no valor de 11,25°C/s em uma temperatura de 769,25°C.

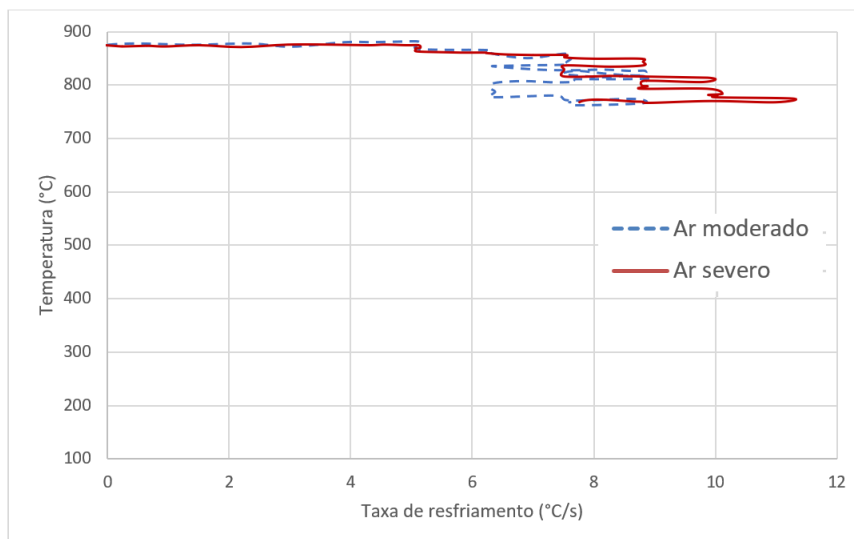


GRÁFICO 2. Taxa de resfriamento utilizando ar como meio de extração de calor. (Autoria própria)

O Gráfico 3 exibe as curvas de resfriamento quando utilizado água como meio de extração de calor. A agitação moderada da peça no meio permitiu o resfriamento da mesma partindo da temperatura de 875°C para 50°C em 17 segundos, enquanto a agitação severa da peça no meio de resfriamento nas mesmas condições de temperatura demorou cerca de 13,8 segundos.

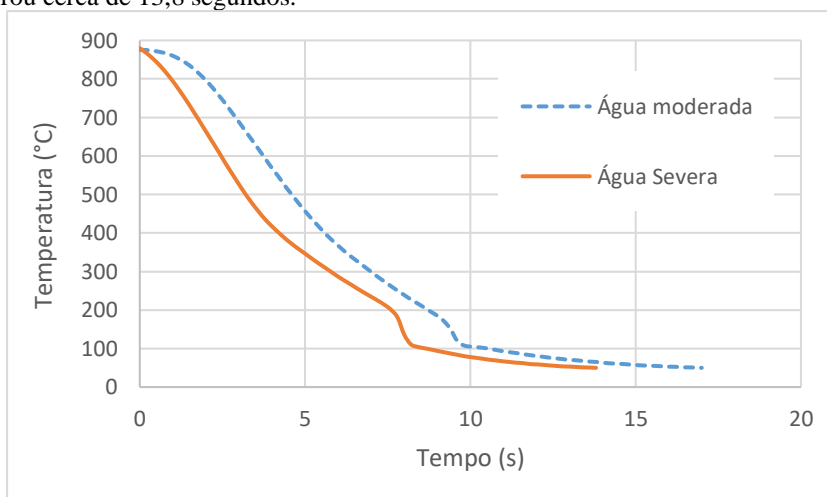


GRÁFICO 3. Curva de resfriamento em água agitada moderadamente e severamente. (Autoria própria)

O Gráfico 4 exibe o comportamento das taxas de resfriamentos quando o corpo de prova é submetido em água. A maior taxa de resfriamento obtida na agitação moderada da peça no meio, 151,25°C/s, ocorre a temperatura de 150,50°C. Na agitação severa a taxa máxima de resfriamento obtida é de 221,25°C/s a uma temperatura de 180,25°C.

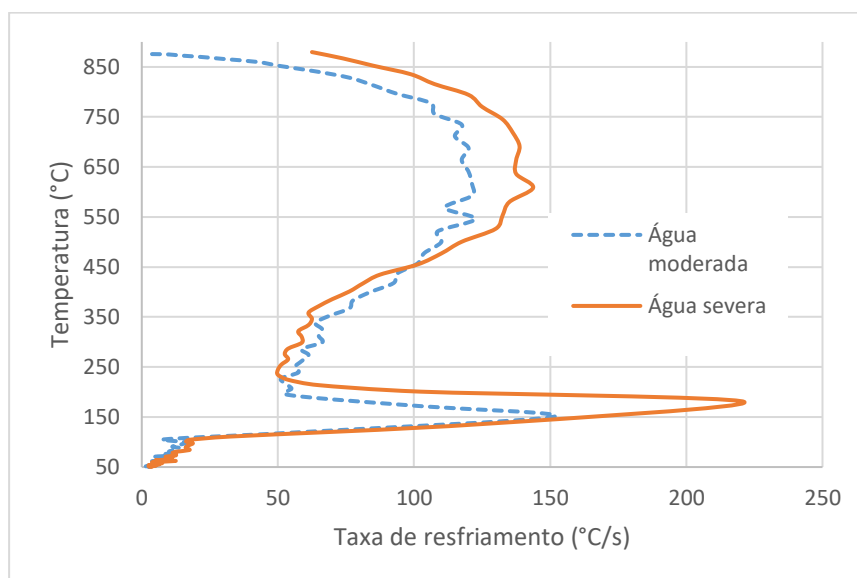


GRÁFICO 4. Taxa de resfriamento utilizando água como meio de extração de calor. (Autoria própria)

O Gráfico 5 apresenta as curvas de resfriamento para a peça utilizando como meio de extração de calor a salmoura. Neste, a agitação moderada da peça no meio demorou cerca de 18,4 segundos para sair da temperatura de 875°C e atingir 50°C, a agitação severa da peça no meio levou cerca de 13,8 segundos para atingir a mesma temperatura. A extração de calor em salmoura agitada severamente acontece de maneira mais linear do que a extração nesse meio quando a peça é agitada moderadamente.

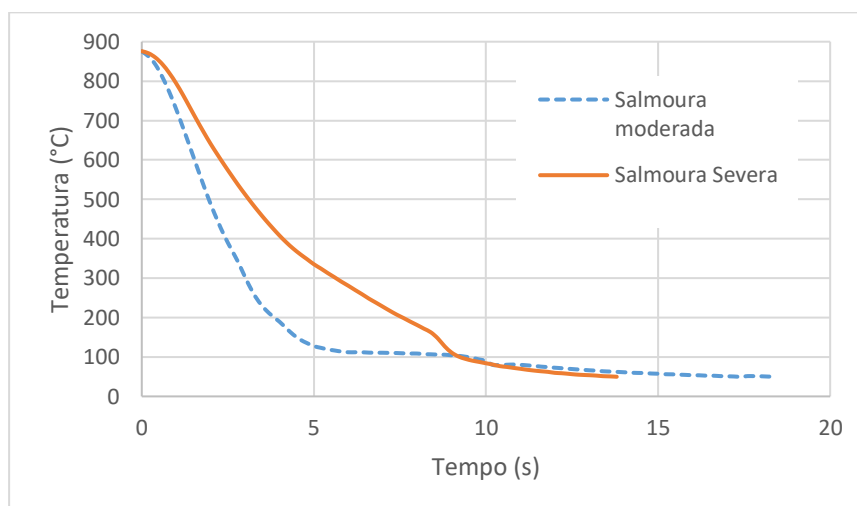


GRÁFICO 5. Curva de resfriamento em salmoura agitada moderadamente e severamente. (Autoria própria)

As taxas de resfriamento obtidas utilizando salmoura como meio de extração de calor são apresentadas no Gráfico 6. A taxa máxima de resfriamento para a agitação da peça moderadamente no meio é de 247,50°C/s a uma temperatura de 632,75°C, e para a peça agitada severamente nesse mesmo meio, a taxa máxima de 158°C/s encontra-se a temperatura de 732,75°C.

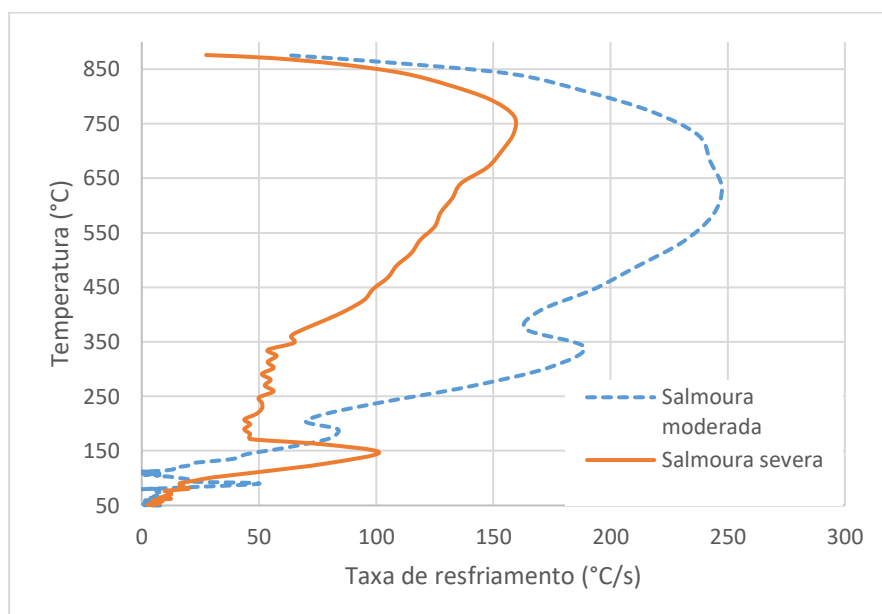


GRÁFICO 6. Taxa de resfriamento utilizando salmoura como meio de extração de calor. (Autoria própria)

Na Tabela 1 é possível comparar as maiores taxas obtidas em cada meio com suas respectivas temperaturas. As taxas maiores para o resfriamento em ar aconteceram em altas temperaturas, portanto as tensões internas resultantes no material foram menores, pois o resfriamento da peça não ocorreu de forma tão brusca.

TABELA 1. Relação da taxa máxima de extração de calor com a temperatura. (Autoria própria)

Meio de extração	Condição de agitação	Temperatura (°C)	Máxima taxa de extração (°C/s)
Ar	Moderado	815,20	8
	Severo	769,25	11
Água	Moderado	150,50	151
	Severo	180,25	221
Salmoura	Moderado	632,75	247
	Severo	732,75	158

Para a água as taxas máximas de resfriamento ocorrem acima de 100°C, isto se explica pela camada de vapor que impede a troca imediata de calor da peça com o meio de extração, no entanto, as altas taxas de resfriamento resultam em tensões internas maiores na peça. Na salmoura a temperatura onde acontece a máxima troca de calor é alta, entre 700°C e 600°C, resultando também em maiores tensões internas na peça.

### 3.2. Dureza

Dentre os aços de baixos teores de elemento de liga utilizados para cementação destaca-se neste artigo o aço ABNT/SAE 8620 que possui uma boa temperabilidade devido aos elementos de liga a ele adicionado [6-7]. A Tabela 2 apresenta sua composição química:

TABELA 2. Composição química (% peso) do aço ABNT/SAE 8620 [8].

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
---	----	---	---	----	----	----	----

0,18 – 0,23	0,70 – 0,90	0,035	0,040	0,15 – 0,30	0,40 – 0,70	0,40 – 0,60	0,15 – 0,25
----------------	----------------	-------	-------	----------------	----------------	----------------	----------------

Uma forma de estimar os efeitos dos elementos de liga sobre a temperabilidade e dureza do aço é através do cálculo do carbono equivalente. Para este cálculo é determinado o valor aproximado do teor do elemento de liga necessário para se obter a mesma dureza que 1% de carbono. Existem diversas expressões na literatura para se calcular o carbono equivalente, sendo mais utilizada a desenvolvida pelo IIW (International Institute of Welding) apresentada pela Equação 1, na qual os símbolos dos elementos presentes fazem referência a composição química da liga (%peso) [9].

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (1)$$

Aplicando a Equação 1 para o aço ABNT/SAE 8620, utilizando a porcentagem em peso média dos seus elementos apresentados na Tabela 2, têm-se que os elementos de liga a ele adicionados equivalem a 0,51% de carbono. O conhecimento desse valor nos permite dizer que ele obterá uma alta dureza quando submetido a meios de extrações de calor mais severos, os resultados de medição de dureza constataram que foi obtido, muito provavelmente, microestrutura martensítica.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos dos ensaios de dureza realizados na superfície das amostras de aço ABNT/SAE 8620 após submetidas aos meios de extração de calor. O ar por apresentar uma menor taxa de resfriamento a dureza resultante foi baixa, não sendo possível mensurá-la em Rockwell C (HRC), utilizou-se então a escala Rockwell B (HRB) por ser uma escala de dureza menor.

TABELA 3. Média dos resultados dos ensaios de dureza para os meios de extração de calor. (Autoria própria)

Ensaio de dureza						
Meio de extração	Ar (HRB)		Água (HRC)		Salmoura (HRC)	
	Moderado	Severo	Moderado	Severo	Moderado	Severo
Média	90,70	93,02	59,0	58,90	59,92	60,23
Desvio Padrão	1,14	0,25	1,07	0,84	1,23	0,48

O Gráfico 7 traz um comparativo dos meios mais severos de resfriamento, sendo eles, água e salmoura, em função das taxas mais severas para cada meio, observa-se que estatisticamente os valores de dureza obtidos para água agitada moderadamente e água agitada severamente são iguais, sendo respectivamente, 59,0 HRC e 58,9 HRC. A dureza maior, de 60,23 HRC, é obtida em salmoura agitada severamente, esta possui o menor desvio padrão das leituras de durezas associadas, de 0,48, a uma taxa de resfriamento baixa quando comparadas aos demais resultados.

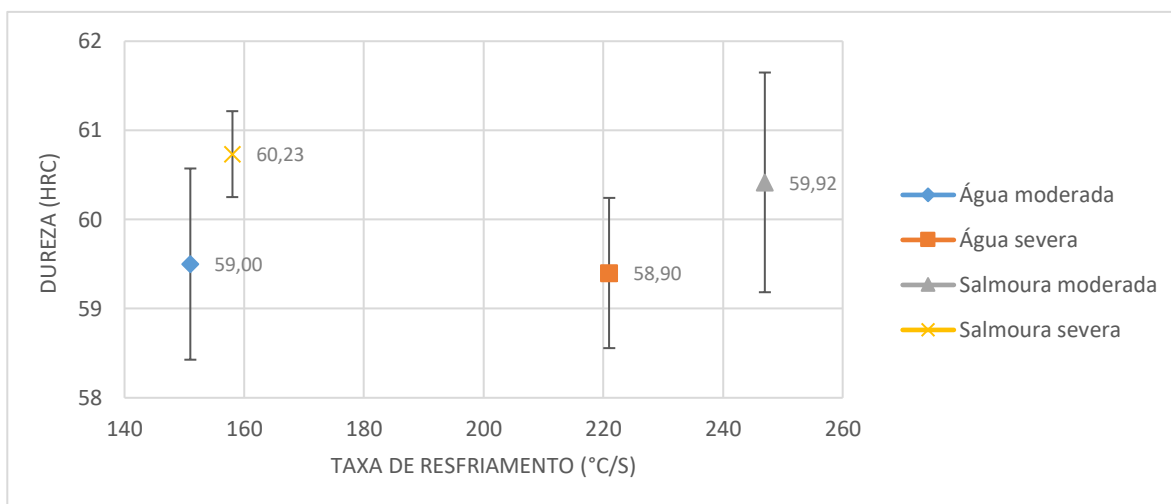


GRÁFICO 7. Dureza em função da maior taxa de resfriamento para os meios mais severos. (Autoria própria)

A Tabela 4 faz o comparativo da dureza obtida dos meios mais severos de resfriamento, em seus estados de agitação, com a obtida por Almada (2017) [10] para este mesmo aço como adquirido de fábrica, sem nenhum tratamento de têmpera ou cementação.

Tabela 4. Comparação dos resultados de dureza obtidos nesse artigo com o resultado obtido para este aço sem tratamento. (Autoria própria)

Meio de extração	Autoria Própria						Almada (2017)
	Ar (HRB)		Água (HRC)		Salmoura (HRC)		Sem tratamento (HRB)
	Moderado	Severo	Moderado	Severo	Moderado	Severo	
Estado de agitação							
Dureza	90,70	93,02	59,0	58,90	59,92	60,23	11,3

As durezas obtidas nestes meios são grandes quando comparadas aos resultados de Almada (2017) para este aço sem processo de tratamento, verificando que de fato o resfriamento resultou no aumento da dureza do material, mesmo em baixas taxas de resfriamento, como é o caso do resfriamento ao ar. Assim como, é possível que os meios mais severos de resfriamento como água e salmoura resultaram em uma estrutura martensítica.

#### 4. CONCLUSÃO

Concluiu-se, por fim, que com o presente trabalho foi possível obter de forma satisfatória as curvas de taxas de resfriamento para ar, água e salmoura, sobre condições de agitação moderadas e severas, para serem utilizadas em tratamentos térmicos por resfriamento contínuo.

De fato, a agitação do meio de resfriamento aumenta a severidade de extração de calor em água e em ar, no entanto, a alteração desse parâmetro para a salmoura diminui a taxa de resfriamento na agitação severa, de modo que menos calor é extraído em um intervalo de tempo.

A extração de calor em salmoura e em água agitadas severamente ocorreu no mesmo intervalo de tempo, de 13,8 segundos, para o mesmo intervalo de temperatura, no entanto, com diferentes taxas de resfriamento. Portanto, avaliando a mais eficiente em termos de maior capacidade de extração de calor, ou seja, maior taxa de resfriamento, pode-se afirmar que a água agitada severamente obteve maior desempenho.

Para aplicações em que se faz necessário apenas valores elevados de dureza do aço ABNT/SAE 8620, pode-se tratá-lo termicamente fazendo o uso de água agitada moderadamente como meio de extração, pois neste



o aço apresentou uma dureza elevada de 59 HRC, o meio terá menos influência na oxidação da peça e a taxa de resfriamento baixa quando comparada aos demais meios, em torno de 151°C/s.

Como a excessiva dureza pode implicar em baixa tenacidade é importante que trabalhos futuros avaliem a tenacidade dentro das condições de extração de calor apresentadas no presente trabalho. Como também, analisar a dureza superficial através de teste de abrasão, uma vez que, este aço é aplicado em peças onde essa característica se faz necessária.

## 5. AGRADECIMENTOS

A autora agradece ao PET Mecânica&Energia por disponibilizar o aço, material metalográfico, termopar e sistema de aquisição de dados, ao CITED por disponibilizar o forno para a realização dos experimentos, ao laboratório de Ensaios Mecânica da UFERSA por disponibilizar a lixadeira polítrix e durômetro para a realização dos ensaios de dureza.

## REFERÊNCIAS

- [1] TOTTEN, G.E.; BATES, C.E.; CLINTON, N.A. Handbook of quenchants and quenching technology. ASM International, Materials Park, 1993.
- [2] ASTM D6200-01, Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. Disponível em: <www.astm.org>. Acesso em: 18 junho 2019.
- [3] BROOKS, C.R. Principles of the heat treatment of plain carbon and low alloy steels. ASM International, Materials Park, 1996.
- [4] CHIAVERINI, Vicente. Boletim Geologia e metalurgia: aços carbonos e aços ligas. C.M.R, São Paulo, n.11, 1954.
- [5] LEITÃO, C.J.; MEI, P.R.; LIBARDI, R. Efeitos da cementação e da nitretação no custo e na qualidade de engrenagens produzidas com aço ABNT 4140 e 8620. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 9, n. 3, p. 257-263, jul.-set. 2012.
- [6] CHIAVERINI, Vicente. Aços e ferros fundidos. Associação brasileira de metalurgia e metais, São Paulo, 7.ed. ampl. e rev, 2012.
- [7] SILVA, A.L.; MEI, P.R. Aços e ligas especiais. Bluncher, São Paulo, 3.ed. 2010.
- [8] ASM HANDBOOK. Properties and selection: irons steels and high performance alloys. ASM International, USA, Vol.1, 1992.
- [9] MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J. Algumas equações úteis em soldagem. Soldag. Insp. São Paulo, Vol. 19, N° 01, p.091-102, Jan/Mar 2014.
- [10] ALMADA, Lucas. Cementação Sólida no aço ABNT 8620 utilizando ferro fundido como fonte de carbono e carbonato de cálcio como ativador. 20017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Bacharelado em ciência e tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró-RN, 2017.
- [11] ASTM E18-19, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, ASTM international, West Conshohocken, PA, 2019. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/426032018/ASTM-E18-2019>. Acesso em: 18 junho 2019.