

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE AUSTÊMPERA EM UM AÇO BAIXA LIGA DO TIPO LNE 380

Luan Marcel Costa Vasconcelos, luanvasconcelos8@hotmail.com¹
Vinicius Aleixo Silvestre, viniciusaleixo11@gmail.com¹
Frank de Mello Liberato, frank.mello@ifmg.edu.br¹
Felipe Farage David, felipe.farage@ifmg.edu.br¹
Cleiton Arlindo Martins, cleiton.martins@gerdau.com.br²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Congonhas, Av. Michael Pereira de Souza, 3007, Campinho, Congonhas-MG, 36417-050.

²Gerdau Ouro Branco, Rodovia MG-443, km 7 s/n, Fazenda do Cadete, Ouro Branco-MG, 36420-000.

Resumo. Estruturas bainíticas tem demonstrado resultados favoráveis em estudos realizados com aços e ferros fundidos, mostrando que há possibilidade de se melhorar as suas propriedades mecânicas apenas com um tratamento térmico, sendo assim, economizando recursos ao evitar a adição de elementos de ligas que, dependendo de sua aplicação, não justificam tal investimento. O seguinte trabalho consiste na realização de tratamentos térmicos de austêmpera em diversas condições de tempo e temperatura em um aço da norma NBR 6656 do tipo LNE 380, com o objetivo de se obter variações da estrutura bainítica e definir um tratamento térmico ideal de forma que esse tratamento melhore as propriedades mecânicas do aço. Embora não se tenha obtido a microestrutura bainítica nas amostras analisadas, os experimentos obtiveram resultados satisfatórios, pois através deles pôde-se selecionar configurações de tempo e temperatura para um tratamento térmico de austêmpera a ser utilizado em trabalhos futuros.

Palavras chave: Austêmpera, LNE 380, Dureza Vickers, Tratamento térmico.

Abstract. Bainitic structures has shown favorable results in made researches with steels and cast irons, showing that is possible to improve its mechanical properties only with a heat treatment, that way, saving resources by avoiding the alloy elements additions which are costly and depending of its application, doesn't justifies the investment. The following paper consists in austemper heat treatments experiments in various conditions of temperature and time in samples of a standard steel NBR 6656 type NBR LNE 380, with the objective of obtaining bainitic microstructures variations and define a ideal configuration for a austemper heat treatment which it will improve significantly the steel's mechanical properties. Although the bainitic structure couldn't be reached in the analyzed steel samples, the experiments had obtained satisfying results, because through then it could be possible to select a configuration of time and temperature for the austemper heat treatment to be used in future experiments.

Keywords: Austemper, LNE 380, Vickers Hardness, Heat treatment.

1. INTRODUÇÃO

Aços e ferros fundidos bainíticos têm sido amplamente utilizados em aplicações estruturais devido ao seu baixo custo, processamento simples, alta dureza, excelentes propriedades mecânicas além de resistência a abrasão. Estudos mostram que aços e ferros fundidos bainíticos possuem uma boa combinação de ductilidade e resistência. Além disso, aços desse tipo podem exibir diferentes propriedades mecânicas, dependendo do tipo de resfriamento contínuo utilizado no tratamento térmico, podendo ser também uma opção de menor custo em alguns casos (Wang *et. al.*, 2016; Cui, 2015; Filho, 2015; Varshney, 2016). Atualmente, esses materiais são utilizados em ferrovias e em peças de maquinário pesado, devido às suas melhores propriedades mecânicas e desempenho em relação ao aço perlítico, que era utilizado anteriormente (Wang *et. al.*, 2016; Cui, 2015).

Para se obter a estrutura bainítica no aço é necessário realizar o tratamento térmico de austêmpera (Kim *et. al.*, 2018). A austêmpera é um tratamento térmico utilizado em aços liga e ferros fundidos, nos quais se deseja obter a estrutura bainítica, composta por agregados de placas de ferrita separadas por filmes finos de austenita, martensita ou cementita. Esses agregados de placas são chamados de feixes (Wang *et. al.*, 2016; Filho, 2015; Totten, 2006). A estrutura bainítica pode ocorrer em duas formas distintas, bainita superior e bainita inferior (Wang *et. al.*, 2016; Totten, 2006). Basicamente, o que separa os tipos de bainita em superior e inferior é a quantidade de carbonetos precipitados. Na bainita superior, a

maior parte do carboneto está presente na interface entre os feixes ferríticos. Já na bainita inferior, a maior parte do carboneto é formada dentro das plaquetas ferríticas sem qualquer transferência de carbono (Pan, 2019).

Embora seja um tratamento térmico aplicado a vários tipos de aços, nem todos os tipos são austemperáveis. Existem vários fatores que influenciam na sua susceptibilidade a austêmpera. Como por exemplo, teores de B, Mn, Mo, Ni e Si podem afetar negativamente a cinética de transformação da bainita, demandando maior tempo para a realização da transformação completa, e em alguns casos, podendo resultar em uma transformação incompleta, embora a maioria desses elementos citados consigam baixar a temperatura inicial de transformação da bainita (B_s), possibilitando a realização do tratamento térmico em temperaturas mais baixas. Um baixo teor de Carbono no aço pode acarretar em uma difusão mais rápida e a formação de uma bainita livre de carbonetos (Zhu *et. al.*, 2020).

Para se realizar o tratamento de austêmpera, o aço é aquecido até que sua estrutura fique completamente austenitizada, em seguida é submetido a austêmpera, onde o aço é resfriado bruscamente em um banho de sal químico ou em uma liga metálica fundida (geralmente de Sn e Pb), a uma temperatura alta que pode variar entre 250 e 500°C, dependendo do tipo de bainita que se deseja obter e da composição química do aço a ser tratado termicamente. O aço então é mantido nesse banho durante um tempo determinado para que se forme a bainita. Em seguida, ele é retirado do banho e resfriado ao ar (Wang *et. al.*, 2016; Filho, 2015; Varshney, 2016; Dakre *et. al.*, 2018). Quanto maior a temperatura de austêmpera, maior a ductilidade, quanto mais baixa a temperatura, maior a dureza e resistência à tração (Filho, 2015).

Aços de baixa liga possuem boa resistência mecânica e são utilizados amplamente na indústria automotiva, como por exemplo os aços da norma NBR 6656 do tipo LNE 380 e do tipo LNE 500 (Siroli *et. al.*, 2018; Teixeira, 2016). O LNE 380, aço utilizado para experimentos neste estudo, é utilizado na fabricação de longarinas, rodas, equipamentos rodoviários, chassis, guindastes, entre outros componentes de automóveis e máquinas, que necessitam de ter boa resistência a fadiga (Frees, 2017).

O seguinte trabalho propõe realizar tratamentos térmicos de austêmpera em amostras de aço de baixa liga da norma NBR 6656 tipo LNE 380 em variadas condições de tempo e temperatura, realizar análises metalográficas e ensaios de dureza, para identificar as variações das microestruturas formadas e também as alterações em suas propriedades mecânicas.

2. METODOLOGIA

O aço de baixa liga da norma NBR 6656 tipo LNE 380 que foi utilizado neste presente trabalho possui a seguinte composição química:

Tabela 1. Composição química do aço LNE 380 utilizado no experimento (% em massa) (Os autores, 2020)

C	Mn	Si	P	S	Nb	Ti	V	Cr	N
0,07	0,98	0,06	0,0018	0,006	0,053	0,011	0,002	0,33	0,003

De acordo com a norma ABNT NBR 6656, a composição química do aço LNE 380 utilizado neste trabalho está dentro dos parâmetros estabelecidos para ele.

Foram realizados tratamentos térmicos de austêmpera, em amostras com dimensões de aproximadamente 10 mm x 10 mm (largura e comprimento, respectivamente) e 4,75 mm de espessura. Nesse trabalho serão testadas nove condições, de modo a verificar como o aço se comporta diante as condições submetidas nos tratamentos térmicos.

De acordo com Cui (2015), durante o processo de austêmpera podem ocorrer dois tipos de reações, em dois estágios. No primeiro estágio, a austenita se decompõe em ferrita (α) e austenita transformada rica em carbono (γ_{HC}). Se o processo de austêmpera for mantido por um período prolongado, começa um segundo estágio de reações na microestrutura, onde a γ_{HC} sofre mais uma decomposição, se transformando em ferrita e ϵ -carbonetos. Esse tipo de carboneto torna o material frágil, portanto, dependendo da aplicação do material, sua formação deve ser evitada.

O intervalo das temperaturas foi definido após a realização do cálculo do diagrama TTT (Tempo-Temperatura-Transformação) em função da composição química do aço, através do MAP Program (Bhadeshia), onde se obteve a temperatura de início de formação da Bainita ($B_s = 599^\circ\text{C}$) e a temperatura de início de formação da Martensita ($M_s = 483^\circ\text{C}$). Com o conhecimento dessas temperaturas, foram escolhidos três valores dentro deste intervalo para a realização do tratamento térmico de austêmpera. As temperaturas escolhidas foram de 510, 540 e 570°C. Os tempos de permanência no banho foram definidos pelos autores, tendo os seguintes valores: 30, 60 e 90 minutos.

Para a realização do tratamento térmico de Austêmpera, primeiramente as amostras foram austenitizadas no forno mufla microprocessado a 930°C durante 30 minutos, em seguida resfriadas uma liga de estanho e chumbo (proporção 50-50) fundida e mantidas nele durante os tempos estipulados anteriormente. Após passado esse tempo, as amostras foram retiradas do banho metálico e deixadas para resfriar ao ar livre, completando o tratamento térmico de austêmpera, com o objetivo de se obter a microestrutura bainítica. Em seguida, as amostras utilizadas para análise metalográficas foram embutidas, lixadas, polidas e tiveram suas superfícies atacadas com Nital 5% durante 14 segundos, para terem suas microestruturas reveladas, possibilitando as análises através do microscópio óptico (OLYMPUS BX41M-LED).

Para os ensaios de dureza, foi utilizado um durômetro do tipo Vickers, utilizando a carga de 30 kgf por 20 segundos. Realizou-se 10 ensaios em diferentes pontos de cada amostra.

Após os ensaios e coleta de dados, os resultados foram analisados e comparados com a literatura, com o objetivo de identificar o tipo de bainita formada pelo tratamento térmico em cada condição.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ensaios de dureza Vickers, obteve-se os valores de dureza que estão dispostos na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Valores de dureza Vickers [HV] (Os autores, 2020)

Número da amostra	Temperatura [°C] / Tempo de Austêmpera [min]	Dureza Vickers Média [HV _m]	Desvio Padrão
1	Sem tratamento térmico	157,2	1,06
2	510/30	153,2	1,24
3	510/60	151,9	2,27
4	510/90	149,8	1,09
5	540/30	123,8	0,92
6	540/60	151,9	1,11
7	540/90	148,5	0,85
8	570/30	142,6	1,05
9	570/60	146,6	1,04
10	570/90	154,2	1,00

Analisando os valores obtidos, percebe-se que o tratamento térmico de austêmpera promoveu uma diminuição na dureza de todas as amostras. Os valores de dureza foram comparados tendo como base a amostra de número 1, que não sofreu nenhum tratamento térmico.

Fazendo a comparação entre amostras que foram tratadas em uma mesma temperatura, construiu-se os seguintes gráficos:

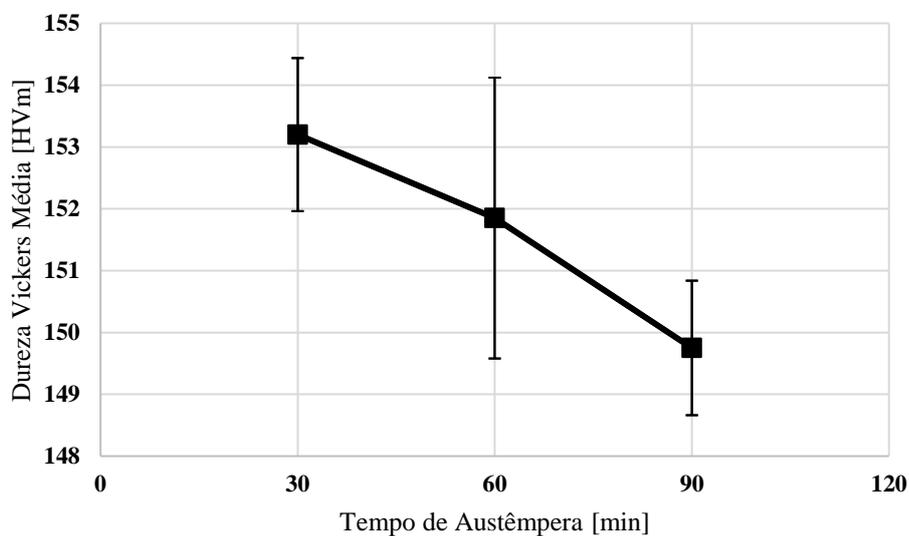


Figura 1. Dureza Vickers média em função do tempo de Austêmpera, para a temperatura de 510 °C. (Os autores, 2020)

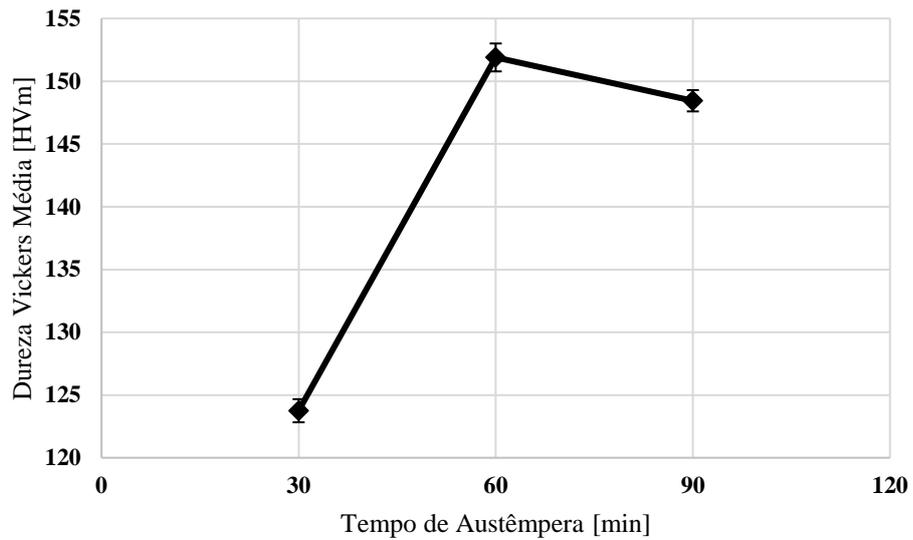


Figura 2. Dureza Vickers média em função do tempo de Austêmpera, para a temperatura de 540 °C. (Os autores, 2020)

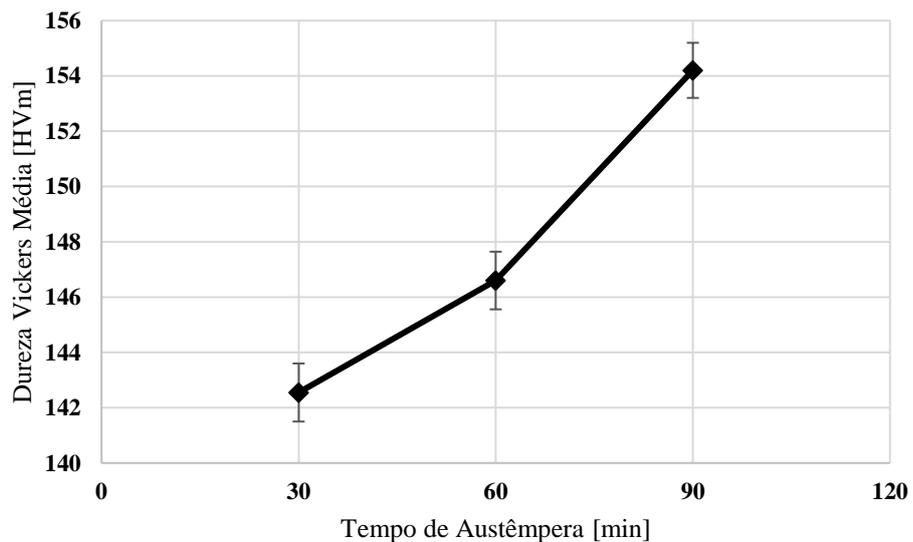


Figura 3. Dureza Vickers média em função do tempo de Austêmpera, para a temperatura de 570 °C. (Os autores, 2020)

Para a temperatura mais baixa, de 510°C, notou-se uma diminuição da dureza média no aço com o aumento do tempo de permanência no banho de austêmpera, no entanto, para a temperatura mais alta, de 570°C, houve um aumento na dureza média apresentado pelo aço, com o aumento do tempo de austêmpera. Ambos os valores ficaram abaixo do valor de dureza apresentado pela amostra de aço que não sofreu nenhum tipo de tratamento térmico.

Para a análise metalográfica, capturou-se imagens de pontos distintos das amostras metalográficas, através da câmera digital OLYMPUS LC-20, acoplada no microscópio óptico OLYMPUS BX41M-LED, possibilitando a identificação das microestruturas presentes no aço, conforme mostram as Figuras 4, 5, 6 e 7 abaixo.

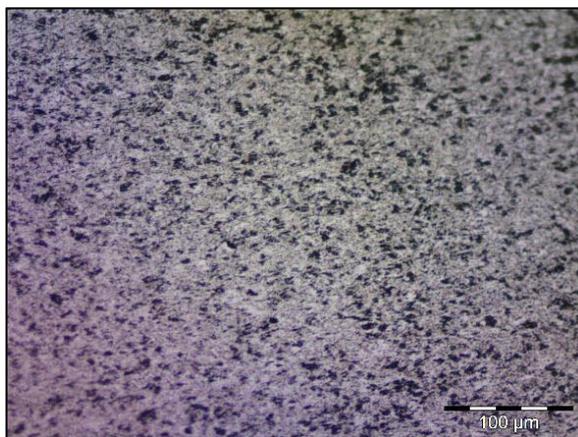


Figura 4. Amostra de aço LNE 380 sem tratamento térmico de austêmpera. Ataque feito com Nital 5% (Ampliação de 200x) (Os autores, 2020)

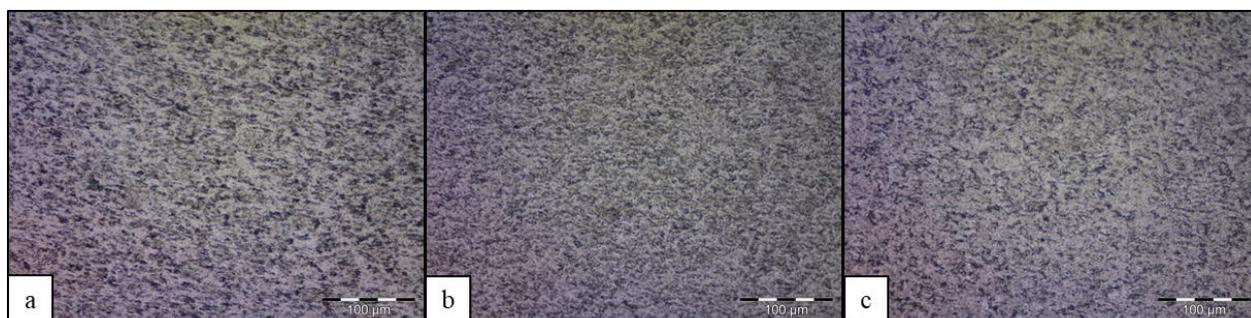


Figura 5. Amostras de aço LNE 380 após o térmico de austêmpera em diferentes tempos, para a temperatura de 510°C. a) 30 min b) 60 min c) 90 min. Ataque feito com Nital 5% (Ampliação de 200x) (Os autores, 2020)

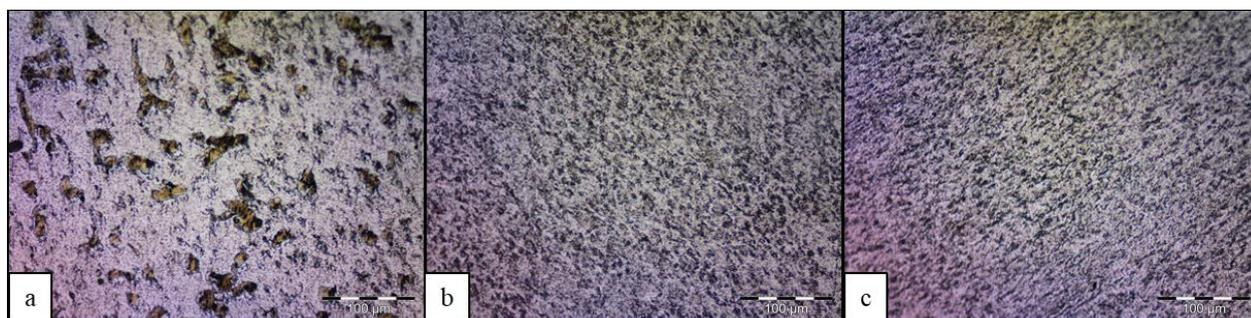


Figura 6. Amostras de aço LNE 380 após o térmico de austêmpera em diferentes tempos, para a temperatura de 540°C. a) 30 min b) 60 min c) 90 min. Ataque feito com Nital 5% (Ampliação de 200x) (Os autores, 2020)

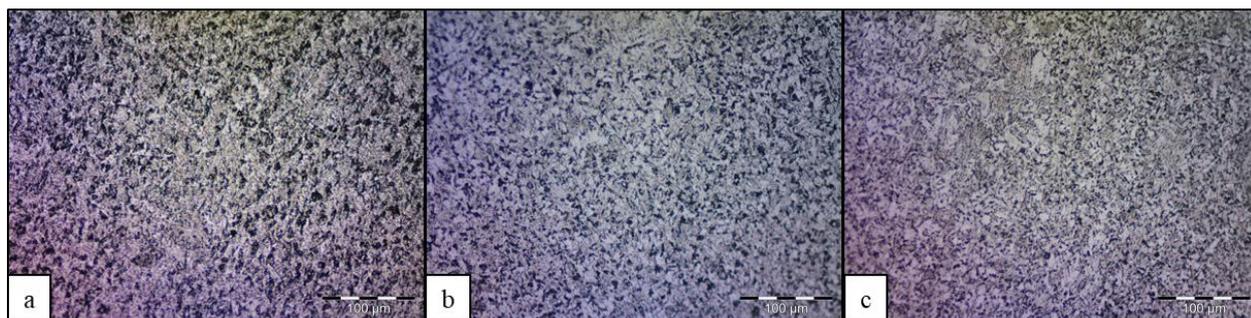


Figura 7. Amostras de aço LNE 380 após o térmico de austêmpera em diferentes tempos, para a temperatura de 570°C. a) 30 min b) 60 min c) 90 min. Ataque feito com Nital 5% (Ampliação de 200x) (Os autores, 2020)

Após análise das amostras, foi possível constatar que os tempos de permanência das amostras de aço no banho metálico para o tratamento térmico de austêmpera não foram suficientes para que se obtivesse a microestrutura bainítica no aço. Foram utilizados os artigos de Hassan (2020), Zhu *et. al.* (2020) e de Pan (2019), para comparação visual das microestruturas encontradas em seus respectivos experimentos com as encontradas neste trabalho. Resultando em uma semelhança maior com as amostras que não sofreram tratamento térmico, mostradas no trabalho de Hassan (2020), onde ele apresenta um aço baixo Carbono microligado ao Manganês, do tipo API X65, que possui estrutura perlítica em uma matriz ferrítica. Pan (2019) e Zhu *et. al.* (2020) apresentam aços do tipo AISI 4140 e SAE 52100, respectivamente, que foram submetidos a tratamentos térmicos de austêmpera em várias temperaturas e intervalos de tempo. Nesses dois últimos artigos é possível observar a evolução das particularidades da estrutura bainítica formada nos aços, de acordo com as condições de temperatura e tempo de transformação a que os aços foram submetidos. Ambos os autores utilizaram banho de sal para a realização do tratamento térmico de austêmpera, diferente do banho metálico que foi utilizado neste presente trabalho.

No trabalho de Rezende *et. al.* (2020), aços que possuem a microestrutura bainítica apresentaram dureza Vickers com valores entre 280 e 400 HV, sendo que nas amostras deste atual trabalho, a dureza máxima encontrada foi de aproximadamente 157 HV. Ainda tendo como base o trabalho de Rezende *et. al.* (2020), foi realizada uma comparação das composições químicas, que apresentaram teores de C variando de 0,35 a 0,47%, e teores de Si de 0,17 a 0,51% (ambas as porcentagens em massa), sendo esses valores significativamente maiores dos que apresentados pelo aço LNE 380, utilizado nos experimentos deste trabalho.

Visualmente, não se observou alterações notáveis nas microestruturas (Figuras 4-7), tendo como base de comparação a amostra de número 1, que não sofreu nenhum tipo de tratamento térmico após o seu processamento final na indústria. Houve apenas uma exceção: a Figura 6-a, correspondente a amostra de número 5, que apresentou o menor valor de dureza dentre as demais amostras analisadas (Tabela 2) e também uma microestrutura com um padrão diferente. Porém, com a utilização dos resultados de ensaios de dureza, foi possível identificar alterações nas propriedades mecânicas das amostras, conforme mostrado anteriormente nas Figuras 1, 2, 3 e também na Tabela 2.

De acordo com Filho (2015), a amostra de número 5 apresenta maior ductilidade e relação as demais amostras, que apresentam maior resistência mecânica.

Como não foram realizados ensaios mecânicos de tração, foi utilizada a “Tabela de Comparação de Dureza”, da Mitsubishi Materials, para correlacionar a dureza Vickers com tensão resistência à tração, e juntamente com a interpolação de valores, foram obtidos os seguintes valores aproximados de resistência à tração correspondente a cada amostra.

Tabela 3. Valores de resistência à tração em função da dureza Vickers (Os autores, 2020)

Número da amostra	Dureza Vickers Média [HV _m]	Resistência à tração [MPa]
1	157,2	520
2	153,2	498
3	151,9	495
4	149,8	490
5	123,8	462
6	151,9	495
7	148,5	484
8	142,6	459
9	146,6	475
10	154,2	501

Outra evidência de que não houve a formação de bainita nas amostras de aço é o resultado dos ensaios de dureza e a resistência à tração estimada. Todas as amostras que foram submetidas ao tratamento térmico de austêmpera apresentaram valores de dureza e resistência à tração estimada inferiores aos valores apresentados pela amostra de número 1, que não sofreu nenhum tratamento térmico durante os experimentos (Tabela 3). Na prática, os tratamentos térmicos realizados proporcionaram às amostras um alívio de tensões e um aumento de sua ductibilidade.

A norma ABNT NBR 6656 exige que o aço LNE 380 possua de 460 a 600 MPa de limite de resistência à tração, e de acordo com a conversão dos valores de dureza Vickers (Tabela 3), as amostras continuam dentro da norma neste quesito. Não foi possível realizar a verificação do limite de escoamento e da porcentagem de alongamento mínimo de cada amostra, que de acordo com a NBR 6656, o limite de escoamento deve estar entre 380 e 530 MPa, e a porcentagem de alongamento mínimo deve ser de pelo menos 23%.

4. CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas com base nos dados obtidos, pôde se concluir que o tratamento térmico de austêmpera realizado no material conferiu uma maior ductilidade e diminuição da dureza em todas as amostras.

Os valores de tempo estabelecidos pelos autores para a permanência no banho metálico foram insuficientes para a transformação da microestrutura austenítica em bainita. Sendo assim, os autores sugerem que sejam realizados novos estudos utilizando tempos maiores para o tratamento térmico, conferindo as temperaturas de início de formação da bainita (Bs) e de início da formação da martensita (Ms), que variam de acordo com a composição química do aço. Também são sugeridas para trabalhos futuros as seguintes alterações: Aumento do volume de metal líquido (liga de Sn-Pb) para o banho de austêmpera ou, a utilização de outro tipo de material para realizar o banho de austêmpera (sal químico ou liga de Zn).

Analisando a norma vigente para a fabricação do aço LNE 380, a ABNT NBR 6656, todas as condições de tratamento térmico testadas neste trabalho conferiram às amostras propriedades que atenderam os requisitos da norma. Porém, não foi possível saber se a microestrutura bainítica, formada através do tratamento térmico de austêmpera, seria capaz de alterar consideravelmente os valores de dureza e resistência à tração do material, de forma que, ainda assim fosse capaz de atender aos requisitos da norma.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Congonhas (IFMG – Campus Congonhas) pela estrutura cedida, fazendo com que fosse possível a realização dos experimentos necessários para a produção deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Bhadeshia, H. K. D. H., MAP Program MAP_STEEL_MUCG46. Disponível em: <<https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/map/steel/programs/mucg46-b.html>>. Acesso em: 3 dez. 2020.
- Cui, J.; Chen, L. Microstructures and Mechanical Properties of a Wear-Resistant Alloyed Ductile Iron Austempered at Various Temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 46a, pp 3637-3634, ago. 2015.
- Dakre, V.; Peshwe, D. R.; Pathak, S. U.; Likhtie, A. Effect of austenitization on microstructure and mechanical Properties of low-carbon-equivalent carbidic austempered ductile iron. *International Journal of Materials, Metallurgy and Materials*, v. 25, pp 770-778, jul. 2018.
- Filho, A. W.; Souza, B. A.; Santos, C. A. Effect of Heat Treatments on Austempered Ductile Iron. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 46a, pp 3637-3634, ago. 2015.
- Frees, M. V. S. *Avaliações sobre o processo de dobramento do aço NBR 6656 LNE 380. 2017.* 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.
- Hassan, S. F.; Al-Wadei, H. Heterogeneous Microstructure of Low-Carbon Microalloyed Steel and Mechanical Properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 29, n. 11, p. 7045–7051, 1 nov. 2020.
- Kim, S. H.; Kim, K. H.; Bae, C. M.; Lee, J. S.; Suh, D. W. Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Medium-Carbon Spring Steel. *Metals and Materials International*, v. 24, pp 693-701, mar. 2018.
- Mitsubishi Materials. Tabela de Comparação de Dureza. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/hardness.html> Acesso em: 02 dez. 2020.
- Norma Brasileira ABNT NBR 6656:2016. Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade – Requisitos.
- Pan, Y.; Wang, B.; Barber, G. C. Study of bainitic transformation kinetics in SAE 52100 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 5, p. 4569–4576, 1 set. 2019.
- Rezende, A. B.; Da Fonseca, S. T.; Fernandes, F. M.; Miranda, R. S.; Grijalba, F. A. F.; Farina, P. F. S.; Mei, P. R. Wear behavior of bainitic and pearlitic microstructures from microalloyed railway wheel steel. *Wear*, v. 456–457, p. 203377, set. 2020.
- Sirolli, A. E. F.; Gedanken, L. L.; Guerra, R.; De Azevedo, F. E. P.; De Camargo, J. E. F.; Couto, A. A. Análise mecânica estrutural e viabilidade econômica na substituição de aços ARBL pela liga de alumínio 6082 em quadro de chassi de caminhão. *23º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, nov. 2018, pp 6368-6379.
- Teixeira, J. C.; De Oliveira, M. C. L.; Antunes, R. A. Efeitos de ciclos curtos de aquecimento sobre as propriedades mecânicas, microestrutura e resistência a corrosão de aços para estampagem utilizados na indústria automobilística. *22º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 11 p, nov. 2016.
- Totten, G.E. *Steels Heat Treatment*. 2.ed. Oregon, Taylor and Francis Group, 2006. 832p
- Varshney, A.; Sangal, S.; Mondal, K. Super Strong and highly ductile low alloy multiphase consisting of bainite, ferrite and retained austenite. *Materials & Design*, v. 95, pp 75-88, jan. 2016.
- Wang, K.; Tan, Z.; Gao, G.; Gao, B.; Gui, X.; Misra, R. D. K.; Bai, B. Microstructure-property relationship in bainitic steel: The effect of austempering. *Materials Science and Engineering: A*, v. 675, pp 120-127, out. 2016.

Luan Marcel Costa Vasconcelos, Vinicius Aleixo Silvestre, Frank de Mello Liberato, Felipe Farage David, Cleiton Arlindo Martins
Efeito do tratamento térmico de austêmpera na microestrutura de um aço baixa liga do tipo LNE 380

Zhu, J. G.; Sun, X.; Barber, G. C.; Han, X.; Qin, H. Bainite Transformation-Kinetics-Microstructure Characterization of Austempered 4140 Steel. *Metals*, v. 10, n. 2, p. 236, fev. 2020.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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