

A influência da granulometria do carvão no processo de cementação sólida do aço AISI / SAE 4140

Karla Valani Marim¹, Victor Aparecido Areia Valani², Ciara Barcelos Zanelato³, André Gustavo de Sousa Galdino⁴

Submissão: 10/02/2020 - Aprovação: 01/03/2020

Resumo - Uma das principais preocupações de todos os pesquisadores na fabricação de aço é a melhoria no desempenho dos aços para fornecer materiais com mais segurança, eficiência e tempo de vida. A cementação em caixa é o tratamento termoquímico mais antigo e aplicado para promover mudança na estrutura e na composição química de aços. Dentro desse contexto, o presente trabalho investigou a influência da granulometria da mistura cementante nas propriedades mecânicas, dureza e resistência à tração do aço AISI/SAE 4140. A pesquisa foi de natureza básica, mas com utilidade imediata e útil para uso em outras investigações ou de tecnologias. Foram avaliados em ensaios nove de tração e dureza dos materiais. Foi observado que o tratamento de cementação promove melhorias no material, aumentando tanto o valor de dureza quanto o limite de resistência à tração. A granulometria do coque de injeção foi interferente apenas no valor de limite de resistência à tração, enquanto granulometrias menores aumentam o valor de resistência à tração do material. Além disso, foi determinado um valor de granulometria (Mesh 16) a partir do qual a granulometria deixa de ser influente no resultado de limite de resistência à tração.

Palavras-chave: Aço. Cementação. Granulometria. Dureza. Resistência à tração.

The influence of coal granulometry in the AISI / SAE 4140 steel solid cementation process

Abstract - One of the major concerns of all researchers in steels industries is improve the performance of materials to gain security, efficiency and lifetime. Carburizing using a solid mixture of carburizing ingredients is the older and applied thermochemical treatment to change physical, mechanical and chemical properties of materials. In this context, investigations were carried out to study the effect of size of the carburizing solid mixture on the mechanical properties, hardness and strength, of steel AISI/SAE 4140. The research was basic in nature, but with immediate utility and useful for use in other investigations or technologies. Nine tensile and hardness tests were evaluated in tests. It was observed that, the mechanical properties of steel were improved by carburizing. The size of carburizing solid mixture had effect only on the result of strength of steel. Smaller sizes had the better results of strength. Also, the results revealed that, there are a size (Mesh 16) from which there is no more improvement on strength.

Keywords: Steel. Carburizin. Size. Hardness. Strength.

INTRODUÇÃO

O aço AISI/SAE 4140, também conhecido como liga aço-cromo-molibdênio, é caracterizado como um aço de baixa liga/médio carbono, usado em aplicações que exigem uma combinação de dureza moderada, boa resistência e tenacidade, mas em que as condições de serviço são apenas moderadamente severas. Esse tipo de aço pode ser utilizado para fabricação de peças e equipamentos nas indústrias química, petroquímica, entre outros (SURYO et al., 2018; ASM HANDBOOK, 1990). Entretanto, os ambientes de trabalho agressivos podem causar desgastes e até falhas de equipamentos (SILVA et al., 2009). Para aumentar a dureza do material e promover uma maior

resistência ao desgaste, aços de baixa liga, como é o caso dos aços SAE 4140, são submetidos a tratamentos térmicos ou termoquímicos, com o intuito de modificar parcialmente sua composição química, alterando as propriedades mecânicas e a estrutura do material (TUKUR et al., 2014; CHIAVERINI, 1977).

O processo de tratamento termoquímico representa uma combinação de operações térmicas e termoquímicas, que visa alterar, principalmente, as propriedades físicas, mecânicas e químicas dos materiais, sem alterar a forma do produto, com objetivo final de aumentar a resistência e a dureza superficial (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2017;

¹ Graduado em Engenharia mecânica. Faculdade Multivix, São Mateus. Contato: victorvalani@hotmail.com

² Graduada em Engenharia mecânica. Faculdade Multivix, São Mateus. Contato: karlavalani@gmail.com

³ Engenheira Mecânica, Mestre em Tecnologias Sustentáveis. Faculdade Multivix, São Mateus. Contato: ciarabarceloszanelato16@gmail.com

⁴ Engenheiro de Materiais, Doutor em Engenharia Mecânica. Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória. Contato: andreg28@gmail.com

CZERWINSKI, 2012a, b). O tratamento termoquímico de endurecimento de superfície mais antigo e clássico é a cementação, na qual há um enriquecimento da superfície do material com carbono (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2017; CZERWINSKI, 2012a, b).

A cementação sólida ou em caixa é o processo de cementação mais empregado por ser de simples operação, não exigir equipamento sofisticado e atmosfera controlada, ser eficiente e econômico. Segundo Suryo et al. (2018), atualmente existe uma busca por melhorias nos processos de tratamento termoquímico para atender as exigências e demandas do mercado. Na cementação sólida ou em caixa, a fonte de carbono é uma mistura de materiais sólidos (carvão vegetal e ativadores). Sendo assim, a granulometria do material pode interferir no processo de difusão, uma vez que a área de contato entre a substância que irá fornecer

o carbono e o aço afeta o processo de transferência de massa e pode interferir na velocidade de difusão e, por consequência, na espessura da camada cementada (CHIAVERINI, 2008; PATAN, 2018). Dessa forma, estudar a granulometria do carvão utilizado na cementação pode otimizar o processo de cementação sólida do aço AISI/SAE 4140, conferindo ao material maior resistência e dureza.

O objetivo geral deste trabalho é relacionar a granulometria do carvão com as propriedades mecânicas do aço SAE 4140, empregando o processo de cementação em caixa.

Para a realização do trabalho, foi obtido o carvão em diferentes granulometrias. Selecionou-se diferentes granulometrias do carvão para serem estudadas, submeteu-se os corpos de prova ao processo de cementação, que caracterizará os corpos de prova em relação à dureza e ao limite de resistência a tração (LRT).

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa desenvolvida pode ser classificada quanto à sua natureza em uma pesquisa básica, pois não apresenta finalidade imediata. Tem como objetivo, porém, gerar conhecimento sobre o processo de cementação sólida do aço SAE 4140, para que tais conhecimentos possam ser aplicados em pesquisas de desenvolvimento ou de tecnologias.

Foi utilizado como material de análise o aço de médio carbono SAE 4140, adequado de acordo com a norma ASTM E8-00M. O aço SAE 4140 é

considerado um material para beneficiamento com temperabilidade considerável, ligados a cromo (Cr) e molibidênio (Mo), tendo uma boa combinação entre resistência mecânica e resistência à fratura. Esse material foi adquirido em forma de barras cilíndricas com diâmetro de 7/8" na Ultra Inox Metais Ltda., no município da Serra, ES. O certificado com a composição química do aço, fornecido pelo fabricante do material, encontra-se em anexo.

Para realização do trabalho, foi utilizado a metodologia que se encontra esquematizada na Figura 1.

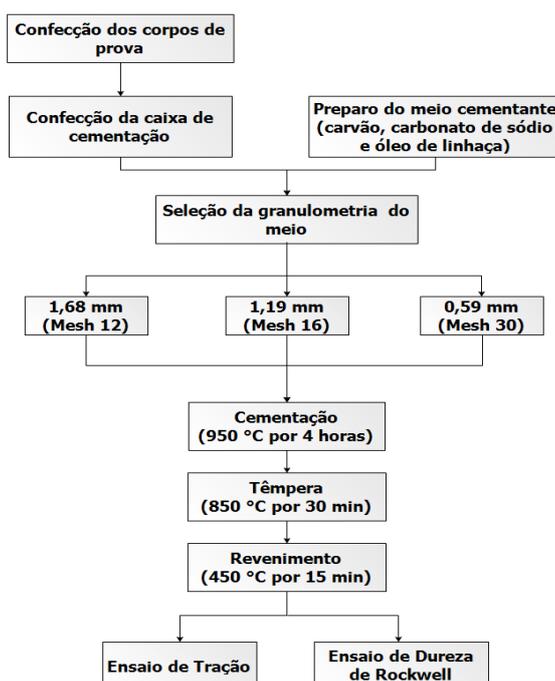


Figura 1. Esquema da metodologia prática para o desenvolvimento desta pesquisa.

A partir do material básico, foram preparados nove corpos de prova, conforme especificação a seguir e demonstração na Figura 2:

a) Para o ensaio tração, foram utilizados cinco corpos destinados, com comprimento total de 150 mm, comprimento das roscas de 50 mm em cada lado e rosca M20 com passo de 2,5 mm, seguindo a norma ASTM -E8/E8M (2004).

b) Para o ensaio de dureza, foram utilizados quatro corpos, com comprimento total de 20 mm e diâmetro de 20 mm.

As amostras foram fabricadas pelo processo de usinagem em torno mecânico na Prando Serviços, São Mateus, ES.



Figura 2. Amostras do aço SAE 4140 para tratamento de cementação em caixa
Fonte: Autores

Para a realização do processo de cementação, foram confeccionadas caixas com dimensões adequadas às dimensões internas do forno mufla. O material utilizado na confecção das caixas foram chapas de aço carbono galvanizada, com dimensões: comprimento 250 mm, largura 150 mm, e altura 150 mm.

O material, fonte de carbono, utilizado no processo de cementação deste trabalho, foi o carvão vegetal, que foi submetido a um processo de moagem manual e, posteriormente, foi separado por peneiramento (peneira Mesh 12; peneira Mesh 16 e peneira Mesh 30). De acordo com Chiaverine (2008), é indicado o uso de ativadores para potencializar a formação de CO_2 durante a

cementação, que, neste estudo, foi utilizado o carbonado de sódio, Na_2CO_3 (marca Dinâmica). A mistura cementante foi composta por 85% em massa de carvão, 13,5% em massa de Na_2CO_3 e 1,5% em massa de óleo de linhaça (GONÇALVES, 2014).

O meio cementante foi disposto no fundo da caixa e os corpos de provas dispostos sobre o meio. As amostras foram cobertas por uma nova camada do coque de injeção e, por fim, foi adicionado uma camada de sílica. A caixa contendo o corpo de prova e o meio cementante foi fechada para que houvesse uma perda mínima dos gases gerados no interior. As etapas do processo de preparo para a cementação estão apresentadas na Figura 3.



Figura 3. Etapas do processo de preparo dos testes de cementação
Fonte: Autores

Os corpos de prova foram submetidos ao processo de tratamento termoquímico de cementação sólida em caixa para as granulometrias estudadas, seguido dos processos térmicos de têmpera e revenimento. Para cada granulometria estudada, foram preparadas dois grupos de amostras: sendo uma destinada à análise de dureza de Rockwell CI C, e o outro corpo de prova para a análise de limite de resistência à tração (LRT).

O tratamento termoquímico de cementação foi realizado em um forno Mufla da marca Quimis, modelo Q318A24 no laboratório da faculdade Multivix São Mateus.

O processo de cementação foi realizado na temperatura de 950 °C por 4 horas, a fim de formar uma camada com certa profundidade de penetração de carbono e formação de carbonetos de ferro que elevem a dureza das amostras. A caixa montada foi colocada no forno a temperatura ambiente e aquecida a uma taxa de 10 °C/min até atingir a temperatura de 950 °C, permanecendo por 4 horas. Após o tratamento termoquímico, as amostras foram retiradas do forno mufla e resfriadas por ventilação forçada até atingir uma temperatura de 650 °C e, em seguida, foram recolocadas no forno para um resfriamento lento. Todas as amostras foram submetidas, em seguida, ao tratamento térmico de têmpera e revenimento, também realizados em forno mufla.

Para o tratamento de têmpera, as amostras foram levadas ao forno a temperatura ambiente, seguindo de aquecimento a uma taxa de 10°C/min até atingir a temperatura de 850 °C, permanecendo por 30 minutos. Em seguida, as mesmas foram retiradas do forno e mergulhadas imediatamente em óleo a 40°C, permanecendo imersas por 1,5 minutos, sendo retiradas em uma temperatura de 70 °C e resfriadas ao ar até temperatura ambiente.

O tratamento de revenimento foi realizado na temperatura de 450°C por 15 min. Após esse tempo,

o forno foi desligado e as amostras sofreram resfriamento lento dentro do forno, sendo retiradas no dia seguinte a temperatura ambiente. As condições de temperatura e tempo dos processos foram definidos com base nos resultados obtidos no estudo de Gonçalves (2014).

Após passarem pelo processo de cementação e têmpera, os corpos de provas foram testados para avaliar a dureza e a tração. Os ensaios de dureza de Rockwell CI C foram realizados seguindo a metodologia descrita na norma ASTM - E18 (2019). Como a temperatura do material de teste e a temperatura do teste de dureza podem afetar os resultados do teste de dureza de Rockwell C, a temperatura foi mantida constante em 25 °C. Na verificação da dureza, o equipamento utilizado foi o durômetro de bancada analógico, fabricante Veb Werkstoffprüfmaschinen Leipzig, fabricação N° 311/36, cedido pelo Laboratório de Ensaios Destrutíveis do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória, ES, tomando dez pontos de ensaio por corpo de prova, com a finalidade de obter-se uma maior confiabilidade na determinação da dureza. Foram realizados testes de dureza de Rockwell C (HRC).

Os testes de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM E8/E8M (2013) e em uma máquina de ensaio universal, fabricante Instron EMIC série 23, cedido pelo Laboratório de Ensaios Destrutíveis do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória, tendo uma velocidade de deformação de 0,2 mm/min, com o objetivo de obter o valor do limite de resistência à tração (LRT), conforme Equação 1.

$$LR = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Em que F é a carga aplicada (N) e A₀ é a área de seção transversal inicial (mm²).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ANÁLISE DE DUREZA

O teste de dureza Rockwell C pode fornecer informações úteis sobre materiais metálicos. Essa informação pode ser correlacionada à resistência à tração, resistência ao desgaste, ductilidade e outras características físicas de materiais metálicos. Também pode ser útil no controle de qualidade e

seleção de materiais (ASTM - E18, 2019; CELESTINO; FELIPE; MACHADO, 2007). Os valores do ensaio de dureza Rockwell C (HRC) para cada granulometria do meio cementante estudado encontram-se na Figura 4.

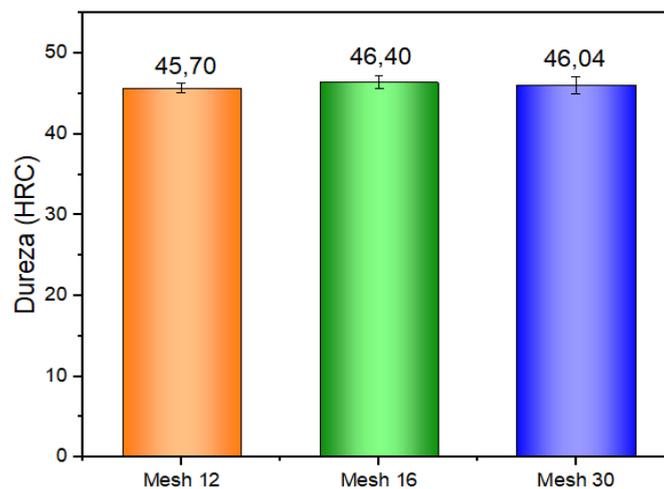


Figura 4. Medidas de análise de dureza Rockwell C C (HRC) para o aço 4140 submetido ao tratamento de cementação sólida com três diferentes granulometrias (Mesh 12, 16 e 30) de meio cementante

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) e os resultados demonstraram que não há diferença estatística entre os valores de dureza de Rockwell C para um nível de confiança de 95%. Dessa forma, pode-se afirmar que a granulometria do meio cementante no processo de cementação não interferiu no valor de dureza final do aço. Cabe ressaltar que o desvio padrão da amostra de Mesh 30 foi consideravelmente elevado, o que infere em uma maior heterogeneidade dessa amostra.

Gonçalves (2014) determinou que a dureza média (HRC) do aço 4140, sem tratamento de cementação, é de $26,45 \pm 1,04$, e que apenas com o processo de cementação o valor de dureza passa a ser $32,38 \pm 0,71$, um ganho de 22,4% na dureza. Zhang et al. (2018) também identificaram que a adição de carbono na matriz do aço aumenta a dureza do material. De acordo com os autores, a

Os ensaios de tração foram realizados com o intuito de avaliar a influência da granulometria do meio cementante sobre o comportamento do aço 4140 quando submetido ao esforço de tração. No ensaio de tração é construído uma curva de tensão

dureza máxima obtida na superfície cementada mostra uma melhoria de cerca de 100% em comparação com a dureza interna.

Observa-se que os valores de dureza obtidos nos testes realizados, embora não tenham sido dependentes da granulometria do meio cementante, acarretam em um ganho de aproximadamente 74% na dureza quando comparada à dureza do aço sem tratamento determinada por Gonçalves (2014). Segundo Abdullah et al. (2017), o aumento na dureza na superfície do aço se deve a adição de partículas de carbono ao ferro, que formam um elemento de Fe à base de carbono, a cementita, Fe_3C , que é dura e quebradiça.

ANÁLISE DE TRAÇÃO

versus deformação. O maior ponto da curva é o ponto de tensão máxima, definido como Limite de Resistência à Tração (LRT). A Figura 5 apresenta os valores de LRT para os testes realizados.

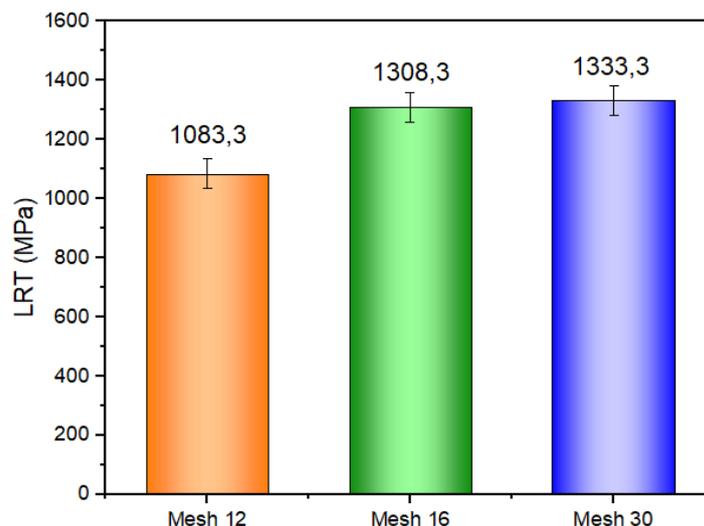


Figura 5. Medidas de Limite de Resistência a Tração (LRT) para o aço 4140 submetido ao tratamento de cementação sólida com três diferentes granulometrias (Mesh 12, 16 e 30) de meio cementante.

O limite de resistência à tração, ou seja, a tensão máxima, ocorre imediatamente antes da estricção do material, que é a diminuição da seção transversal do corpo de prova no local onde ocorre a ruptura. Dessa forma, o limite de resistência é uma propriedade que especifica o material e caracteriza bem a resistência do material (RASMA, 2015; SOUZA, 1982). Para o aço submetido ao processo de cementação com granulometria do meio cementante Mesh 16 (1,19 mm), o valor de LRC teve um aumento de 20,8 % em relação ao aço submetido ao processo de cementação com granulometria do meio cementante Mesh 12 (1,68 mm). Ao passo que o resultado de LRC do aço submetido ao processo de cementação com granulometria do meio cementante Mesh 30 (0,59 mm) apresentou uma diferença de apenas 2% em relação ao aço submetido ao processo de cementação com granulometria do meio cementante Mesh 16 (1,19 mm).

Turatti, Birck e Toso (2017) avaliaram o comportamento mecânico do aço SAE 4140 e identificaram que o aço SAE 4140, sem tratamentos térmicos e/ou termoquímicos, apresenta uma resistência à tração em média de 933 MPa. Senthilkumar, Rajendran e Pellizzari (2011) determinaram um valor de resistência à tração para o aço sem tratamento de 1039 MPa.

Os resultados obtidos demonstram que houve um aumento em torno de 30% no valor de LRT em

comparação com os dados encontrados na literatura, sugerindo que o aço adquiriu uma maior resistência. Esse aumento ocorre porque na temperatura do tratamento de cementação o aço apresenta uma microestrutura do tipo austenita. Sendo assim, durante o processo de resfriamento há uma transformação da austenita para martensita (adição de átomos de carbono na estrutura cristalina dos átomos de ferro), o que resulta em uma mudança na estrutura e, conseqüentemente, uma maior resistência à tração e dureza (SENTHILKUMAR et al., 2011).

A diminuição da granulometria foi um fator interferente no valor de LRT. Granulometrias menores obtiveram um maior valor de resistência a tração. Contudo, a variação dos valores do limite de resistência obtidos entre os tratamentos para o meio cementante com Mesh 16 e Mesh 30 não foi tão significativa. Portanto, com base nos resultados obtidos, pode-se inferir que a diminuição da granulometria do meio cementante favorece a penetração e a adsorção do carbono na superfície do aço, aumentando, dessa forma, a resistência do material. Porém, existe um limite máximo de adição de átomos de carbono na estrutura cristalina dos átomos de ferro, a partir do qual, a redução na granulometria do coque de injeção não promove um aumento no valor de LRT.

CONCLUSÃO

Os testes de dureza de Rockwell Ci comprovaram a eficiência do processo de tratamento termoquímico. O material obteve um

ganho de 74% no valor de dureza quando comparado aos valores de dureza encontrados da literatura. Foi evidenciado nos resultados que a

granulometria do coque de injeção não tem influência sobre os valores de dureza. Não foi observada diferença estatística entre os valores de dureza para as granulometrias estudadas.

Os limites de resistência à tração demonstraram que a granulometria do meio cementante pode interferir no valor final de LRT do material cementado. A redução da granulometria favoreceu a difusão do carbono no aço, aumentando o valor de resistência. Porém, existe um limite a partir do qual a granulometria deixa de ser influente. Para o sistema estudado, foi encontrado que a melhor

condição para o meio cementante seria com uma granulometria Mesh 16 ou Mesh 30.

O processo de tratamento termoquímico de cementação em caixa tem a capacidade de promover melhorias nas propriedades mecânicas do aço. A granulometria do meio cementante é um parâmetro a ser avaliado na determinação das condições de processo, pois pode ser otimizada para favorecer algumas propriedades, como o limite de resistência à tração.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, B.; JUMADIN, H. M.; ISMAIL, M. H.; ALIAS, S. K.; AHMAD, S. Correlation of case depth with mechanical properties of low carbon steel using paste carburizing method. *Pertanika journal of science and technology*, v. 25, n. S3, p. 91–98, 2017. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/b48e/0978aea648d8be0f92d7c33dd89a2c68be6.pdf?_ga=2.266206223.105887448.1572813341-1254741500.1572813341. Acesso em: 28 out. 2019.
- ASM HANDBOOK. *Properties and selection: Irons, steel and high-performance alloys*. 10. ed. USA: ASM International, 1990. Disponível em: <http://the-eye.eu/public/Books/Materials%20science%20and%20engineering/M317%20Steel%20and%20alloys/ASM%20Handbook%20%20Properties%20and%20Selection%20Irons%20Steels%20and%20High%20Performance%20Alloys.pdf>. Acesso em: 06 mar 2019.
- ASTM - E18. *Standard test methods for Rockwell C Hardness of metallic materials*. West Conshohocken, PA: ASTM standards, 2019. Disponível em: http://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2680/3/ASTM_E18-15.pdf. Acesso em: 06 mar 2019.
- ASTM -E8/E8M. *Standard test methods for tension testing of metallic materials metric*. West Conshohocken, PA: ASTM standards, 2004. Disponível em: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E8M-01.htm>. Acesso em: 06 mar 2019.
- BARRA, G. C. P. *Estudo de viabilidade técnica e econômica de troca de processo de cementação em linha industrial de tratamento térmico*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007340.pdf>. Acesso em: 06 mar 2019.
- BHADESHIA, H.; HONEYCOMBE, R. Thermomechanical treatment of steel. *Steels Microstruct. Prop.* 4. ed. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2017. p. 271–301. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>. Acesso em: 22 abril 2019.
- CALLISTER, J. W. D. *Ciência e engenharia dos materiais*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. Disponível em: <https://www.estudocerteiro.com/single-post/2017/07/23/Ciencia-e-Engenharia-dos-Materiais---William-Callister---5-Edicao---Download>. Acesso em: 23 abril 2019.
- CELESTINO, P. A. P.; FELIPE, R. C. T. S.; MACHADO, T. G. Análise comparativa entre o tratamento térmico (têmpera) e o tratamento termoquímico (cementação) realizado em aço 1040. *Holos*, v. 3, p. 223–232, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/270409571_ANALISE_COMPARATIVA_ENTRE_O_TRATAMENTO_TERMICO_TEMPERA_E_O_TRATAMENTO_TERMOQUIMICO_CEMENTACAO_REALIZADO_EM_ACO_1040. Acesso em: 23 abril 2019.
- CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamento térmico, principais tipos*. 4. ed. São Paulo: ABM, 1977. Disponível em: https://www.academia.edu/37125289/A%C3%A7os_Ferros_Fundidos_Vicente_Chiaverini. Acesso em: 06 mar 2019.
- _____. *Tecnologia mecânica - Processos de fabricação e tratamnto*. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. Disponível em: <https://kaiohdutra.files.wordpress.com/2012/10/vicente-chiaverini-tecnologia-mecc3a2nica-vol-ii-processos-de-fabricac3a7c3a3o-e-tratamento.pdf>. Acesso em: 23 abril 2019.
- _____. *Tratamento térmico das ligas metálicas*. 2. ed. São Paulo: ABM, 2008. Disponível em: <https://www.academia.edu/29477029/chiaiverini-tratamento-termico-das-ligas-metalicas-pdf.pdf>. Acesso em: 12 set 2019.
- CZERWINSKI, F. *Heat treatment – conventional and novel applications*. Croácia: Intech, 2012a. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Fathollah_Sajedi/publication/231336919_Heat_Treatment_Conventional_and_Novel_Applications/links/09e4150683d7f0e5d5000000/Heat-Treatment-Conventional-and-NovelApplications.pdf?origin=publication_detail. Acesso em: 06 mar 2019.
- _____. *Thermochemical Treatment of Metals. Heat Treat. - Conv. Nov. Appl.* Croácia: Intech, 2012b. .
- SILVA, S. E. T. P. *Análise das propriedades mecânicas e estruturais do aço Sae 4140 submetido a tratamento criogênico*. Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2012. Disponível em: <http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/DISSERTAÇÃO-FINAL-5.pdf>. Acesso em: 08 mar 2019.
- ECHEVERRI, E. A. A. *Análise numérica e experimental das tensões residuais geradas durante o processo de têmpera de cilindros de aço AISI 1045, 4140 e 4340*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-21062013105727/publico/Dissertacao_EdwanAndersonArizaEcheverri.pdf

. Acesso em: 09 mar 2019.

GONÇALVES, R. B. P. *Estudo avaliativo da resistência ao impacto de um aço sae 4140 após tratamento termoquímico de cementação*. Universidade Federal do Sul e Suldeste do Pará, 2014. Disponível em: https://femat.unifesspa.edu.br/images/TCCs/2014/TCC-Raylison_Bruno_Pires_Goncalves_2014.pdf. Acesso em: 08 set 2019.

HERRMANN, K. *Hardness testing: Principles and applications*. Ohio: ASM International, 2011.

LIMA, L. G. M. N. et al. Análise das propriedades mecânicas e estruturais do aço AISI/SAE 4140 submetido a tratamento criogênico. *15ª ENEMET*, p. 563–572, 2015. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/analise-das-propriedades-mecanicas-e-estruturais-do-aco-aisi-sae-4140-submetido-a-tratamento-criogenico>. Acesso em: 23 abril 2019.

PATAN, G. K. *Tratamento termoquímico de cementação utilizando cinza da casca de arroz e carvão vegetal em aço SAE 1020 seguido de tratamento térmico de têmpera e revenido*. Universidade Federal do Pampa, 2018. Disponível em: https://www.uam.es/gruposinv/meva/publicaciones/jesus/capitulos_espanyol_jesus/2005_motivacion_para_el_aprendizaje_Perspectiva_alumnos.pdf%0Ahttps://www.researchgate.net/profile/Juan_Aparicio7/publication/253571379_Los_estudios_sobre_el_cambio_conceptual_>. Acesso em: 10 março 2019.

PINTAUDE, G. *Análise dos regimes moderado de severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Giuseppe_Pintaude/publication/279751662_Analise_dos_regimes_moderado_de_severo_de_desgaste_abrasivo_utilizando_ensaios_instrumentados_de_dureza/links/55fc52dd08aeba1d9f3dd87e.pdf. Acesso em: 08 mar 2019.

RASMA, E. T. *Caracterização estrutural e mecânica do aço Aisi / Sae 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos*. Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2015. Disponível

em: <http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/DISSERTA%C3%87%C3%83O-FINAL-ELINE.pdf>. Acesso em: 09 mar 2019.

SILVA, C. C. et al. Evaluation of AISI 4140 steel repair without post-weld heat treatment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 18, n. 3, p. 324–331, 2009. Disponível em: https://www.academia.edu/34950066/Evaluation_of_AISI_4140_Steel_Repair_Without_Post-Weld_Heat_Treatment. Acesso em: 10 mar 2019.

SOUZA, S. A. De. *Ensaaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos*. 5. ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher Ltda, 1982. Disponível em: https://kupdf.net/download/livro-fundamentos-ensaios-mecanicos-de-materiais-met-aacute-licos-autor-souza-editora-edgar-blucher-5-edicao_58c1f5c6e12e89b062add374_pdf. Acesso em: 28 out 2019.

SURYO, S. H. et al. Parameter optimization of heat treatment on AISI 4140 Material Hardness Value for Bucket Application Using Taguchi Method. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 13, n. 14, p. 5873–5880, 2018. Disponível em: <http://docsdrive.com/pdfs/medwelljournals/jeasci/2018/5873-5880.pdf>. Acesso em: 10 mar 2019.

TUKUR, S. . et al. Effect of tempering temperature on mechanical properties of medium carbon Steel. *International journal of engineering trends and technology*, v. 9, n. 15, p. 798–800, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275597447_Effect_of_Tempering_Temperature_on_Mechanical_Properties_of_Medium_Carbon_Steel. Acesso em: 10 mar 2019.

ZHANG, L. J. et al. Effect of solid carburization on the surface microstructure and mechanical properties of the equiatomic CoCrFeNi high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 769, p. 27–36, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/326726840_Effect_of_solid_carburization_on_the_surface_microstructure_and_mechanical_properties_of_the_equiatomic_CoCrFeNi_high-entropy_alloy. Acesso em: 28 out 2019.

ANEXO A – Certificado de qualidade do aço 4140.

 <p>ultra inox aços e metais</p>	<p>Rua Humberto de Campos, 17 - Jardim Limoeiro – Serra – ES - Cep : 29.164-034 Telefax : (027) 3200 – 8040 / 3328 – 1884 E-mail : ultrainox@terra.com.br</p>																							
<p>CERTIFICADO DE QUALIDADE / QUALITY CERTIFICATE N° 4564</p>																								
<p>Data / Date : 14/08/2019 Cliente / Client : VICTOR APARECIDO AREJA VALANI Endereço / Address : RUA MANOEL CAETANO FILHO, N° 39 – DOM JOSE DALVIT – SÃO MATEUS – ES Certificado da Usina / Steel Mill's Certificate : 814984042019 / 77636</p> <p>Nossa Nota Fiscal / Bill Number : 64.767 Nossa Ordem de Serviço / Production Order : 000000 Seu Pedido / Order : 000000</p> <p>Especificações do Material / Material Specification : AÇO 4140 LAM. 7/8" (22,23) Condição de Fornecimento / Delivery Condition: Norma Aplicada / Material Type : SAE 4140</p>																								
<p>COMPOSIÇÃO QUÍMICA / CHEMICAL COMPOSITION (%)</p>																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Corrida Heat</td> <td style="width: 15%;">48073916</td> <td style="width: 15%;">AÇO 4140 LAM. 7/8" (22,23)</td> </tr> </table>	Corrida Heat	48073916	AÇO 4140 LAM. 7/8" (22,23)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 10%;">C</td> <td style="width: 10%;">Mn</td> <td style="width: 10%;">P</td> <td style="width: 10%;">S</td> <td style="width: 10%;">Si</td> <td style="width: 10%;">Ni</td> <td style="width: 10%;">Cr</td> <td style="width: 10%;">Mo</td> <td style="width: 10%;">Al</td> <td style="width: 10%;">Cu</td> </tr> <tr> <td>0,38</td> <td>0,78</td> <td>0,017</td> <td>0,009</td> <td>0,24</td> <td>0,08</td> <td>0,86</td> <td>0,16</td> <td>0,011</td> <td>0,21</td> </tr> </table>	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	0,38	0,78	0,017	0,009	0,24	0,08	0,86	0,16	0,011	0,21
Corrida Heat	48073916	AÇO 4140 LAM. 7/8" (22,23)																						
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu															
0,38	0,78	0,017	0,009	0,24	0,08	0,86	0,16	0,011	0,21															
<p>Padrões</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">Mínimo</td> <td style="width: 50%;">Máximo</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>	Mínimo	Máximo			<p style="text-align: center;">PROPRIEDADES MECÂNICAS / MECHANICAL PROPERTIES</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">Limite de Resistência Tensile Strength (MPa)</td> <td style="width: 50%;">Dureza Hardness</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td>Limite de Escoamento Yield Strength (MPa)</td> <td>Alongamento Enlongation (%)</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td>Estricção Reduction of Área (MPa)</td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>	Limite de Resistência Tensile Strength (MPa)	Dureza Hardness			Limite de Escoamento Yield Strength (MPa)	Alongamento Enlongation (%)			Estricção Reduction of Área (MPa)										
Mínimo	Máximo																							
Limite de Resistência Tensile Strength (MPa)	Dureza Hardness																							
Limite de Escoamento Yield Strength (MPa)	Alongamento Enlongation (%)																							
Estricção Reduction of Área (MPa)																								
<p>Certificamos que a informação neste documento é uma reprodução exata do certificado da USINA FABRICANTE. Certif that information presented in this document is an exact reproduction of the certificate of the steel mill / manufacture.</p> <p style="text-align: right;">   CONTROLE DE QUALIDADE </p>																								