

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

Felipe Canal

ESTUDO DA APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS
COMBINADOS DE *DEEP-ROLLING* E NITRETAÇÃO A PLASMA EM UM
AÇO BAINÍTICO DE RESFRIAMENTO CONTÍNUO

PORTO ALEGRE

2023

FELIPE CANAL

Estudo da Aplicação dos Tratamentos Superficiais Combinados de *Deep-Rolling* e Nitretação a Plasma em um Aço Bainítico de Resfriamento Contínuo

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Porto Alegre

2023

PÁGIDA DE CATALOGAÇÃO
FELIPE CANAL

**Estudo da Aplicação dos Tratamentos Superficiais Combinados de *Deep-Rolling* e
Nitretação a Plasma no Aço Bainítico de Resfriamento Contínuo**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Coordenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão – UFMG – Belo Horizonte _____

Prof. Dr. Vinicius Waechter Dias – IFRS – Caxias do Sul _____

Prof. Dr. Mario Wolfart Junior – IFC – Luzerna _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por todo apoio e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha por imenso conhecimento compartilhado, apoio e acompanhamento neste período.

Ao prof. Dr. Mário Wolfart Junior, o qual sempre apoiou e incentivou o meu crescimento desde a graduação.

A todos os colegas e colaboradores do LdTM/GES pelos auxílios durante os ensaios e experimentos. Em especial, aos colegas Mateus Pasini, Cristiano Turra, Leonardo Oliveira e João Piovesan pela disponibilidade em todos os momentos que necessitei de ajuda.

A todos os laboratórios do PPGE3M, que de alguma fomentaram o desenvolvimento da minha pesquisa e pelo compartilhamento de conhecimento.

Ao Prof. Dr. Richard de Medeiros Castro da UNISATC pela realização dos ensaios tribológicos.

Agradeço ao prof. Dr. Alexandre Mendes Abraão e ao Dr. Diego Azevedo da UFMG, por cooperar com meu trabalho viabilizando os ensaios de *Deep-rolling*.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro via bolsa de mestrado acadêmico com processo n° 130473/2021-9.) que possibilitou a dedicação em tempo integral para realização deste trabalho.

Ao auxílio da CAPES – Programa BRAGECRIM (Processo no. 88881.142485/2017-01 – auxílio n° 1844/2017) e CAPES – PROEX (Processo 23038.000341/2019-71) e CNPq (processo n° 435795/2018-0).

A todas as pessoas que de alguma forma colaboram diariamente para o desenvolvimento das pesquisas científicas nas universidades, difundindo o conhecimento e proporcionando o crescimento profissional dos alunos.

RESUMO

A relevância dos aços bainíticos de resfriamento contínuo está atrelada a possibilidade de obter alta resistência mecânica com o controle da taxa de resfriamento eliminando etapas posteriores de reaquecimento, o que reduz o consumo energético. No entanto, o aprimoramento tribológico ainda é necessário. O processo de *Deep-rolling*, promove uma deformação plástica superficial que reduz a rugosidade, aumenta a dureza e gera tensões residuais compressivas. Já a nitretação a plasma, é caracterizada por formar uma camada superficial de alta dureza e por consequência, alta resistência ao desgaste. No presente estudo, foi realizado uma análise sobre a combinação destes dois tratamentos superficiais, visando aliar os benefícios de cada processo. O tratamento de *Deep-rolling*, foi realizado em pressões de 150 e 250 bar, com velocidade de 300 mm/min, esfera de 6,3 mm e um passe sobre a superfície. Para a nitretação a plasma, foi utilizada uma mistura gasosa de 24%vol. N₂ e 76%vol. H₂, por 6h, em 400 e 500 °C. As amostras foram analisadas em termos de rugosidade, microdureza Vickers, ultramicrodureza, microestrutura, análise de fases e tensões residuais via difração de Raios-X, perfil de composição química GDOES e ensaio de desgaste pino sobre disco. A aplicação do *Deep-rolling* ao aço bainítico, reduziu a rugosidade em aproximadamente 40%, aumentou a dureza superficial e induziu tensões residuais compressivas, sendo máximas abaixo da superfície de -813 MPa e -853,6 MPa para ambas as pressões. A combinação dos tratamentos, indica que a deformação plástica, a qual é mais intensa na superfície, facilita a difusão do nitrogênio, já as tensões residuais compressivas, atuam como barreiras, dificultando a difusão do nitrogênio. Como consequência, ocorre um aumento da camada de compostos e redução da camada de difusão para ambas as temperaturas. O percentual dos nitretos formadores da camada de compostos também é modificado, aumentando os nitretos ϵ -Fe₂₋₃(C)N e reduzindo os nitretos γ' -Fe₄N, interferindo na dureza da camada de compostos. Esses efeitos tendem a aumentar com a pressão de tratamento do *Deep-rolling*. Para ambas as temperaturas de nitretação foi observado um relaxamento parcial das tensões residuais compressivas originárias do *Deep-rolling*, o qual aumenta com a temperatura de nitretação. O melhor desempenho tribológico esteve atrelado à maior dureza da camada nitretada obtido na condição *Deep-rolling* a 150 bar seguido de nitretação a plasma a 400°C, apontando que o fator mandatório esteve relacionado à dureza, a qual é regida pelo percentual de nitretos ϵ -Fe₂₋₃(C)N e γ' -Fe₄N.

Palavras Chaves: Nitretação a plasma, *Deep-rolling*, aço bainítico, tensões residuais.

ABSTRACT

The relevance of continuous cooling bainitic steels is linked to the possibility of obtaining high mechanical resistance by controlling the cooling rate, eliminating subsequent reheating steps, which reduces energy consumption. However, tribological improvement is still needed. The Deep-rolling process promotes surface plastic deformation that reduces roughness, increases hardness and generates compressive residual stresses. Plasma nitriding, on the other hand, is characterized by forming a surface layer of high hardness and, consequently, high resistance to wear. In the present study, an analysis was carried out on the combination of these two surface treatments, aiming to combine the benefits of each process. The Deep-rolling treatment was carried out at pressures of 150 and 250 bar, with a speed of 300 mm/min, a 6.3 mm sphere and one pass over the surface. For plasma nitriding, a gas mixture of 24%vol N₂ and 76% vol. H₂ was used, for 6h, at 400 and 500 °C. The samples were analyzed in terms of roughness, Vickers microhardness, ultramicrohardness, microstructure, phase analysis and residual stresses via X-ray diffraction, GDOES chemical composition profile and pin-on-disc wear test. The application of deep-rolling to bainitic steel reduced roughness by approximately 40%, increased surface hardness and induced compressive residual stresses, with maximum values below the surface of -813 MPa and -853.6 MPa for both pressures. The combination of treatments indicates that plastic deformation, which is more intense on the surface, facilitates nitrogen diffusion, while compressive residual stresses act as barriers, hindering nitrogen diffusion. As a consequence, there is an increase in the compound layer and a reduction in the diffusion layer for both temperatures. The percentage of nitrides forming the compound layer is also modified, increasing the ϵ -Fe₂-3(C)N nitrides and reducing the γ' -Fe₄N nitrides, interfering with the hardness of the compound layer. These effects tend to increase with Deep-rolling treatment pressure. For both nitriding temperatures, a partial relaxation of the compressive residual stresses originating from deep-rolling was observed, which increases with the nitriding temperature. The best tribological performance was achieved to the greater hardness of the nitrided layer obtained in the Deep-rolling condition at 150 bar followed by plasma nitriding at 400°C, pointing out that the mandatory factor was related to hardness, which is governed by the percentage of nitrides ϵ -Fe₂-3(C)N and γ' -Fe₄N.

Keywords: Plasma nitriding, Deep rolling, bainitic steel, residual stresses.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento e desenvolvimento do setor industrial ao longo dos anos é regido pela busca de novas alternativas que possibilitem aperfeiçoar o desempenho dos projetos de engenharia, no que diz respeito aos componentes mecânicos, podendo ser dividido em dois fatores principais: a) para reduzir o gasto energético tanto da cadeia produtiva, por meio da redução de etapas de processamento, quanto dos maquinários produzidos, através da redução de massa; b) para prolongar a vida útil desses componentes, maximizando suas propriedades mecânicas.

Os aços bainíticos de resfriamento contínuo vêm se apresentando como uma ótima alternativa para a redução de energia na indústria nas últimas décadas. Estes materiais, através do resfriamento controlado, atingem propriedades mecânicas similares a alguns aços temperados e revenidos, porém, sem a necessidade de etapas posteriores de reaquecimento após a conformação (SOURMAIL, 2017; FIGUEIREDO, 2019; TURRA, 2021). Além disso, os aços bainíticos apresentam uma ótima relação entre tenacidade e resistência à tração. Um estudo desenvolvido por MENEZES, (2021) para um aço bainítico de resfriamento contínuo, demonstrou uma redução de energia de 45% na cadeia produtiva de uma engrenagem quando comparado a uma rota convencional. O fator mandatório para obtenção destes aços com essas características está em sua composição química, a qual contém elementos de liga como o Silício (Si), que tem o efeito de retardar a formação de cementita e contribuir para obtenção de uma microestrutura livre de carbonetos, levando à alta resistência mecânica aliada à tenacidade (BHADESHIA, 2019).

Apesar da boa resistência mecânica e a vantagem das curtas rotas de processamento, ainda existe a necessidade de melhorar as características superficiais dos aços bainíticos de resfriamento contínuo para melhorar o desempenho dos componentes mecânicos fabricados a partir destes materiais. Neste aspecto, o emprego da engenharia de superfície, a qual engloba todas as atividades relacionadas ao melhoramento superficial de componentes mecânicos, torna-se importantíssima para a redução de custos de produção, tanto do ponto de vista de melhorar a vida útil dos componentes mecânicos, como também em diminuir a frequência de manutenção das máquinas. A engenharia de

superfície abrange não apenas as etapas iniciais de manufatura e a aplicação e estudo dos tratamentos superficiais dos componentes mecânicos, mas também o comportamento da superfície destes componentes quando em serviço (BURAKWSKI, 1999).

O impacto da engenharia de superfície na economia mundial pode contribuir positivamente, se dado a devida importância ao tema. Com relação a falhas de componentes causadas por desgaste e corrosão, elas representaram, respectivamente, uma perda no PIB da Alemanha de 1 e 3,5% no ano de 2006 (BACH *et al.* 2006). Um estudo realizado por HOLMBER e ERDEMIR, (2017), constatou que 23% da energia gasta no mundo provém de contatos tribológicos, com 20% gasto para vencer o atrito e 3% está relacionado à substituição e manutenção de componentes devido ao desgaste e falhas por desgaste. Assim, o desenvolvimento de novos tratamentos superficiais para melhorar o desempenho tribológico dos componentes mecânicos é fundamental para convergir em uma diminuição dos gastos relacionados a falhas superficiais.

Os inúmeros mecanismos atuantes na superfície dos componentes acabam por causar falhas precoces, condenando grandes equipamentos. Cada tratamento superficial possui um objetivo principal em relação à melhoria do desempenho do componente tratado. O tratamento mecânico superficial de *Deep-rolling* é aplicado com o intuito de prolongar a vida em fadiga através da indução de tensões residuais compressivas na superfície e redução da rugosidade. Já a nitretação a plasma tem como principal finalidade melhorar a resistência ao desgaste a partir de uma camada superficial de alta dureza, além de afetar positivamente a vida em fadiga e resistência à corrosão. No entanto, apesar de contribuir de forma indireta para outros mecanismos, cada um desses tratamentos possui sua aplicação destinada a um benefício principal. Isto posto, a combinação de tratamentos superficiais com a finalidade de aliar as vantagens de cada tratamento é uma alternativa louvável para que se possa maximizar o desempenho de componentes em serviço.

Ainda que a combinação dos tratamentos superficiais de *Deep-rolling* e nitretação a plasma vislumbre uma ótima possibilidade para ampliar a capacidade superficial dos materiais, é necessário investigar essa ideia em relação as intervenções que cada tratamento irá causar sobre o outro, para futuramente realizar ensaios de fadiga os quais demandam tempo e recursos.

O presente trabalho se propõe a combinar os tratamentos superficiais de *Deep-rolling* e nitretação a plasma aplicados em um aço bainítico de resfriamento contínuo e

avaliar a viabilidade desta combinação, ou seja, a possibilidade de aliar as vantagens de cada tratamento.

1.1 Objetivos

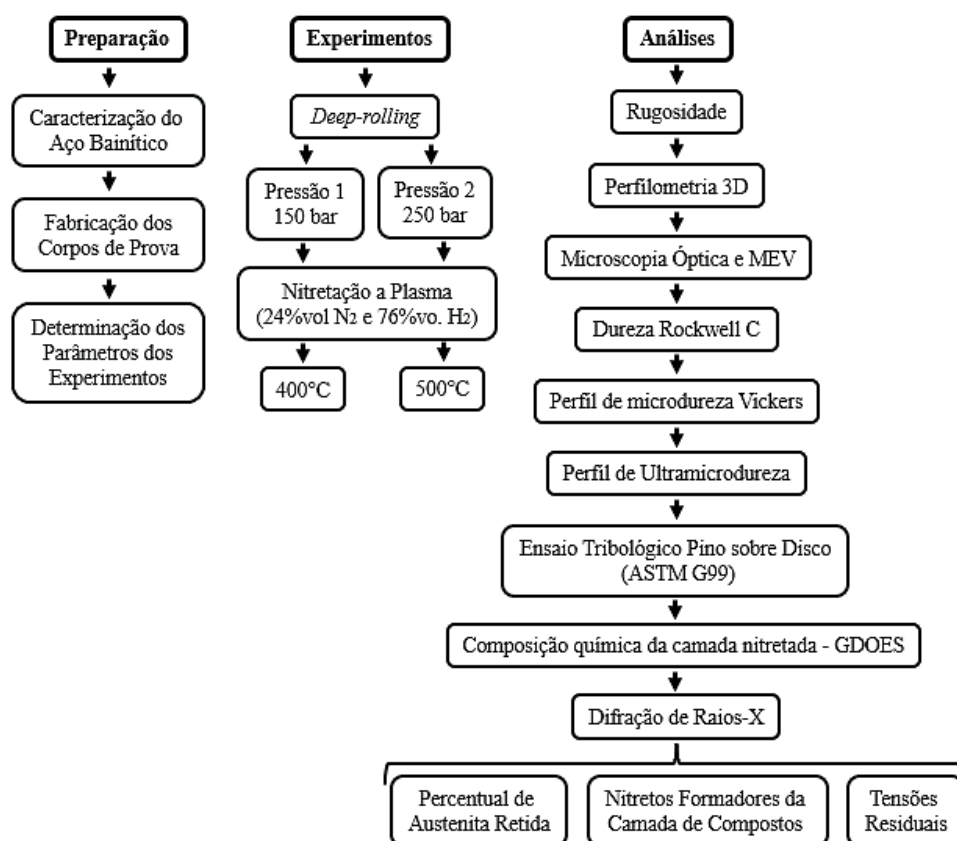
O presente trabalho tem por objetivo avaliar as características superficiais resultantes da combinação dos tratamentos superficiais de *Deep-rolling* e nitretação a plasma aplicados ao aço bainítico de resfriamento contínuo DIN18MnCrSiMo6-4, visando avaliar quais as influências que o *Deep-rolling* impõe sobre a camada nitretada a plasma e a interferência do processo de nitretação a plasma causa sobre as tensões residuais obtidas via *Deep-rolling*.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 23 apresenta um fluxograma que descreve a realização do presente trabalho. Inicialmente foi realizado a estruturação do trabalho com a caracterização do material em seu estado de recebimento, determinação da geometria dos corpos de prova com base nos tratamentos e análises a serem realizadas e definição dos parâmetros dos tratamentos superficiais.

Na segunda etapa se sucedeu a execução dos tratamentos superficiais. Em um primeiro momento foram conduzidos os tratamentos mecânicos superficiais de *Deep-rolling* e então investigadas as mudanças superficiais impostas pelo processo. Posteriormente foram realizados os ensaios de nitretação a plasma dos corpos de prova no estado de recebimento (usinados) e nos corpos de prova tratados via *Deep-rolling*. Após a execução de todos os tratamentos propostos, as amostras obtidas foram conduzidas para as análises.

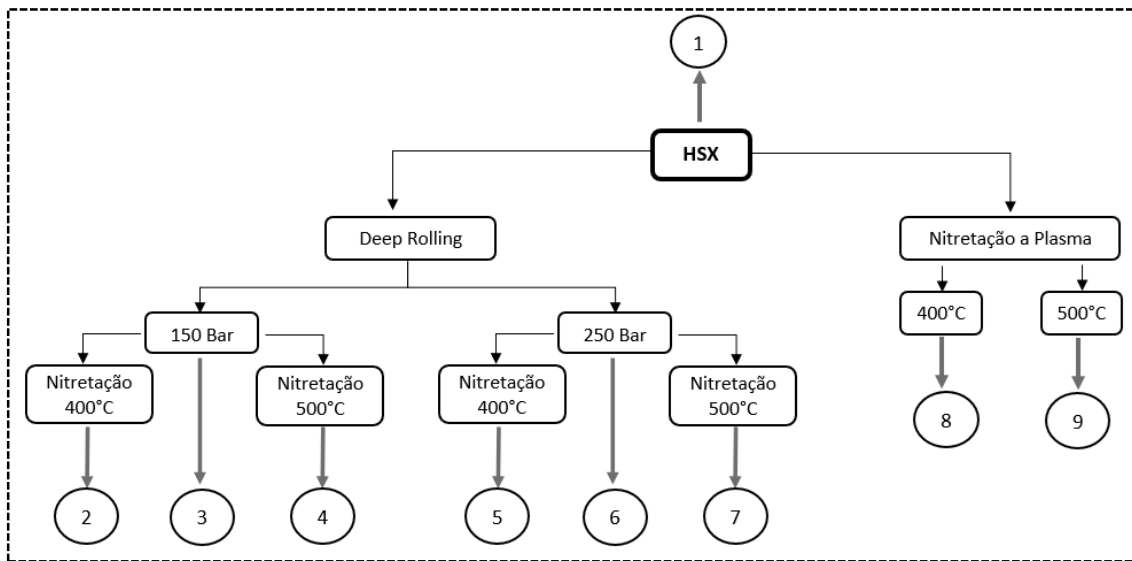
Figura 01 - Fluxograma das etapas realizadas no trabalho.



Fonte: O autor.

A Figura 24 a seguir, apresenta um fluxograma com as condições a serem avaliadas. A condição 1 refere-se ao material no estado laminado de recebimento para caracterização. As amostras 3 e 6 tratadas via *Deep-rolling*, foram separadas para análise deste tratamento superficial de forma isolada. Já as condições 8 e 9, correspondem a nitretação a plasma realizada no material em seu estado de recebimento, para então avaliar e comparar com os corpos de prova previamente tratados via *Deep-rolling* e então nitretados a plasma (condições 2, 4, 5 e 7).

Figura 02 - Fluxograma das condições de tratamento.



Fonte: O autor.

4. CONCLUSÕES

Com relação a aplicação do tratamento mecânico superficial de *Deep-rolling* no aço bainítico de resfriamento contínuo DIN 18MnCrSiMo6-4 podem ser traçadas as seguintes conclusões:

A zona de deformação plástica aumenta com a pressão de tratamento de 150 para 250bar.

Obteve-se uma redução da rugosidade em 40% em termos de Ra, a qual foi similar para ambas as pressões utilizadas de 150 e 250bar, de modo que o aumento da pressão não necessariamente irá implicar em redução da rugosidade.

Tensões residuais compressivas foram obtidas, com valores atingindo um pico de -813MPa e -853,6MPa para as pressões de 150 e 250bar. O aumento da pressão interferiu principalmente nas tensões superficiais sendo -406,5 e -665MPa para DR150 e DR250 respectivamente. Já a profundidades superiores a 50µm os perfis são similares. A tendencia observada nos perfis, é de que as tensões se mantem a profundidades superiores a 300µm antes de tenderem a tensões trativas.

A deformação plástica proporcionou um aumento da dureza superficial, aumento que também está atrelado a transformação da austenita retida. Como consequência

o desempenho tribológico das amostras tratadas via *Deep-rolling* foi superior quando comparada a amostra usinada. A menor rugosidade atrelada a maior dureza, proporcionou um coeficiente de atrito reduzido nos instantes iniciais do ensaio de desgaste.

Combinação dos tratamentos superficiais de *Deep-rolling* e nitretação a plasma:

A variação da espessura da camada nitretada, tende a ser mais intensa com o aumento da pressão de tratamento do *Deep-rolling* (150 para 250bar).

O aumento da concentração de nitrogênio devido a deformação plástica também interferiu nos nitretos formadores da camada de compostos, aumentando o percentual de nitretos ϵ -Fe₂₋₃(C)N e reduzindo os nitretos γ' -Fe₄N. Essa variação tende a aumentar com a pressão de tratamento do *Deep-rolling*.

O desempenho tribológico foi regido pela dureza das amostras, principalmente da camada de compostos.

5. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Determinação dos limites de pressão utilizados no *Deep-rolling* para o aço bainítico DIN 18MnCrSiMo6-4;
2. Avaliar a resistência a fadiga do aço bainítico quando submetido ao *Deep-rolling* em função da variação de pressão do processo;
3. Aplicar o *Deep-rolling* em superfícies polidas e posteriormente a nitretação a plasma, para eliminar os efeitos da rugosidade sobre os processos;
4. Investigar a microestrutura da camada de difusão para aços bainíticos em função da temperatura de tratamento (revenimento da bainita?);
5. Realizar ensaios de fadiga em corpos de prova submetidos a combinação de *Deep-rolling* + nitretação a plasma;
6. Aplicar a combinação de tratamentos superficiais em componentes mecânicos (eixos, matrizes) e avaliar o desempenho em relação a resistência a fadiga e resistência ao desgaste;
7. Explorar tratamentos superficiais de Nitrocarbonetação e Oxinitrocarbonetação em superfícies previamente tratadas via *Deep-rolling*;
8. Avaliar a combinação de *Deep-rolling* e nitretação a plasma como uma alternativa para acelerar a difusão do nitrogênio e diminuir o tempo de nitretação;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, H. Formação da fase bainítica em aços de baixo carbono. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, p. 175-181, 23 ago. 2006.
- ABRÃO, A. M., DENKENA, B., KÖHLER, J., BREIDENSTEIN, B., & MÖRKE, T. The influence of deep rolling on the surface integrity of AISI 1060 high carbon steel. *Procedia CIRP*, 13, 31–36. (2014, a).
- ABRÃO, A. M., DENKENA, B., KÖHLER, J., BREIDENSTEIN, B., MÖRKE, T., & RODRIGUES, P. C. M. The influence of heat treatment and deep rolling on the mechanical properties and integrity of AISI 1060 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 3020–3030 (2014, b).
- AGHAJANI, H.; BEHRANGI, S. *Plasma Nitriding of Steels*: Springer International Publishing Switzerland, 2017.
- ALIOFKHAZRAEI M. *Modern Surface Engineering Treatments*. InTech 2013.
- ALVES, Clodomiro. *Nitretação a Plasma: Fundamentos e Aplicações*, 2001.
- ALTENBERGER, I. *Deep Rolling-the Past, the Present and the Future*. 2005.
- ALMEIDA, Elisângela Aparecida dos Santos de; COSTA, César Edil da; MILAN, Júlio César Giubilei. Study of the nitrided layer obtained by different nitriding methods. *Revista Matéria*, v. 20, n. 2, p. 460-465, 17 out. 2015.
- ASM HANDBOOK. *Surface Engineering*. v. 5. 1 ed. Materials Park: ASM International, 1994. 1979 p.
- ASWAD, M. F., MOHAMMED, A. J., & FARAJ, S. R. Induction Surface Hardening: A review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1), 2021.
- BACH, F. W., MÖHVALD, K., LAARMANN, A., & WENZ, T. *Modern Surface Technology* Edited by. In Science and Technology, 2006.
- BEVILAQUA, W. L.; EPP, J.; MEYER, H.; ROCHA, A. S.; ROELOFS, H. In situ investigation of the bainitic transformation from deformed austenite during continuous cooling in a low carbon Mn-Si-Cr-Mo steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51A: 3627–3637, 2020.
- BHADESHIA, H. K. D. H.; EDMONDS, D. V. Bainite in silicon steels: new composition-property approach. *Metal Science*, v. 17, p. 411-419, 1 set. 1983.
- BHADESHIA, H. K. D. H. Atomic mechanism of the bainite transformation. *Bainite – from nano to macro*, Symposium on science and application of Bainite, v. 1, p. 2-11, jun. 2017.
- BHAMARE, S.; RAMAKRISHNAN, G.; MANNAVA S. R.; LANGER, K.; VASUDEVAN, V. K.; QIAN, D. Simulation-based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo alloy. *Surface & Coatings Technology* vol. 232 p. 464–474. 2013.
- BIEHLER, J.; HOCHE, H.; OECHSNER, M. Corrosion properties of polished and shot-peened austenitic stainless steel 304L and 316L with and without plasma nitriding. *Surfaces and Coatings Technology*, p. 40-46, 17 out. 2017.

BLECK, W.; BAMBACH, M.; WIRTHS, V.; STIEBEN, A. Microalloyed Engineering Steels with Improved Performance. Bainite – from nano to macro, Symposium on science and application of Bainite, v. 1, p. 21-31, jun. 2017.

BURAKWSKI T, WIERZCHON T. Surface Engineering of Metals - Principles, Equipment, Technologies. Analysis. 1999.

BRINKSMEIER, E., GARBRECHT, M., & MEYER, D. Cold surface hardening. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 541–544. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.100>. 2008.

CABALLERO, F. G.; SANTOFIMIA, M. J.; CAPDEVILA, C.; GARCÍA-MATEO, C.; GARCIA DE ANDRES, C. Design of advanced bainitic steels by optimization of TTT diagrams and T0 curves. *ISIJ International*, 46(10): 1479–1488, 2006.

CABALLERO, F. G.; SANTOFIMIA, M. J.; GARCÍA-MATEO, C.; CHAO, J.; GARCIA DE ANDRES, C. Theoretical design and advanced microstructure in super high strength steels. *Materials and Design*, 30: 2077–2083, 2009. b.

CABALLERO, F. G.; MATEO, C. Garcia. Phase transformations in advanced bainitic steels. National Centre for Metallurgical Research, Woodhead Publishing Limited, p. 271-294, 23 jan. 2012.

CASTRO, P. J.; SILVEIRA, A. C. de F.; IVANISKI, T. M.; TURRA, C. J.; EPP, J.; ROCHA, A. da S. Two-Step Continuous Cooling Heat Treatment Applied in a Low Carbon Bainitic Steel. *Materials Research*, v. 24, n. 2, 23 jan. 2021,a.

CASTRO, P. J. Estudo da aplicação de tratamentos termomecânicos no campo da austenita metaestável em um aço bainítico de baixo carbono e de resfriamento contínuo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021,b 159 p.

CLAUER A. H. Laser Shock Peening for Fatigue Resistance. *Surface Performance of Titanium*. Pag 217-230. (1996).

CHANG, L.C.; BHADSHIA, H.K.D.H. Austenite fillls in bainitic Illicrostructures: *Materials Science and Technology*. *ISIJ international*, v. 11, n. 8, p. 874-881, 21 abr. 1995.

CHAMPION, Y. (YANNICK), & FECHT, H.-J. Nano-architected and nanostructured materials: fabrication, control and properties. Wiley-VCH. 2004.

CHATTOPADHYAY C.; SANGA S.; MONDAL K.; GARG. A. Improved wear resistance of medium carbon micro alloyed bainitic steels. *Wear*, n. 289, p. 168-179, 19 maio 2012.

CHANGLE, Z; SHOUHAIB, L; HANGUANGA, F; YINGHUAC, L. Microstructure evolution and wear resistance of high silicon bainitic steel after austempering. *Journal of Materials Research and Technology*, n. 9, p. 4826-4839, 14 mar. 2020.

CHEN, Y; REN, R; ZHAO, X; CHEN, C; PAN, R. Study on the surface microstructure evolution and wear property of bainitic rail steel under dry sliding wear. *Wear*, n. 9, p. 448-449, 4 fev. 2020.

CHEMKHI, M.; RETRAINT, D.; ROOS, A.; GARNIER, C.; WALTZ, L.; DEMANGEL, C.; PROUST, G. The effect of surface mechanical attrition treatment on low temperature plasma nitriding of an austenitic stainless steel. *Surface & Coatings Technology*, p. 191-195, 14 fev. 2013.

COTA, A. B.; SANTOS, D. B. Microstructural Characterization of Bainitic Steel Submitted to Torsion Testing and Interrupted Accelerated Cooling. *MATERIALS CHARACTERIZATION*, Elsevier Science Inc, v. 44, p. 291-299, 23 jan. 2000.

DALCIN, R. L. Influência Da Nitretação A Plasma Sobre A Resistência Ao Desgaste De Engrenagens Forjadas Em Aço Bainítico De Resfriamento Contínuo De Baixo Carbono. 232 p. Tese (Doutorado) - UFRGS, Porto Alegre, 2021.

DALCIN, R. L.; HATWIG, R. A.; OLIVEIRA, L. F.; ZOTTIS, J.; EPP, J.; ZOCH, H.-W.; ROCHA, A. S. Surface processing to improve the fatigue strength of bainitic steels – An overview. *International Journal of Engineering & Technology*, 8(3): 324–332, 2019. a.

DALCIN, R. L.; OLIVEIRA, L. F.; ROCHA, A. S. Caracterização do aço DIN 18MnCrSiMo6-4 nitretado a plasma com mistura gasosa composta por 76% N₂. In: 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. São Carlos, 2019. b.

DALCIN, R. L.; OLIVEIRA, L. F.; DIEHL, I. L.; DIAS, V. W.; ROCHA, A. S. Response of a DIN 18MnCrSiMo6-4 continuous cooling bainitic steel to plasma nitriding with a nitrogen rich gas composition. *Materials Research*, 23(2): e20200036, 2020. a.

DALCIN, R. L.; OLIVEIRA, L. F.; DIEHL, C. A. T. S.; ROCHA, A. S. Response of a DIN 18MnCrSiMo6-4 continuous cooling bainitic steel to different plasma nitriding gas mixtures. *Materials Research*, 23(5): e20200269, 2020. b.

DALCIN, R. L.; ROCHA, A. S.; CASTRO, V. V.; OLIVEIRA, L. F.; NEVES, J. C. K.; SILVA, C. H.; MALFATTI, C. F. Influence of plasma nitriding treatments with a nitrogen rich gas composition on the reciprocating sliding wear of a DIN 18MnCrSiMo6-4 steel. *Materials Research*, 24(4): e20200592, 2021.

DEEG W. E. New Algorithms for Calculating Hertzian Stresses, Deformations and Contact Zone Parameters. *AMP Journal of Technology*, v. 2, p. 1-11, 1992.

DELGADO, P., CUESTA, I. I., ALEGRE, J. M., & DÍAZ, A. State of the Art of Deep Rolling. *Precision Engineering*, 46, 1–10. 2016.

DENKENA, B., GROVE, T., BREIDENSTEIN, B., ABRÃO, A., & MEYER, K. Correlation between process load and deep rolling induced residual stress profiles. *Procedia* 2018.

DENKENA, B., ABRÃO, A., KRÖDEL, A., & MEYER, K. Analytic roughness prediction by deep rolling. *Production Engineering*, 14(3), 345–354, 2020.

DENKENA, B; GROVE, T; MAISS, O. Influence of hard turned roller bearings surface on surface integrity after deep rolling. 3rd CIRP Conference on Surface Integrity (CIRP CSI), p. 359-362, 2016.

DING, K; YE, L. *Laser Shock Peening: Performance and Process Simulation*. 1. ed. Cambridge England: Woodhead Publishing Limited, 2006.

DOBROCKY, D.; POKORNY, Z.; STUDENY, Z.; DOAN, Thanh V.. Analyse of Tribological Properties of Layers Created by Plasma Nitriding + DLC. MANUFACTURING TECHNOLOGY, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 379- 386, 1 jun. 2018.

DONG, J.; SKALECKI, M. G.; HATWIG, R. A.; BEVILAQUA, W. L.; STARK, A.; EPP, J.; ROCHA, A. S.; ZOCH, H.-W. Study of microstructural development of bainitic steel using eddy current and synchrotron XRD in-situ measurement techniques during thermomechanical treatment. HTM Journal of Heat Treatment and Materials, 75(1): 3–22, 2020.

FAN, Y.; GUI, X.; LIU, M.; WANG, X.; BAI, B.; GAO, G.. Effect of microstructure on wear and rolling contact fatigue behaviors of bainitic/martensitic rail steels. Wear, p. 508-519, 18 ago. 2022.

FENG, X.; ZHOU, H.; ZHENG, Y.; ZHANG, K.; ZHANG, Y.. Tribological behavior and wear mechanism of Ti/MoS₂ films deposited on plasma nitrided CF170 steel sliding against different mating materials. Vacuum, p. 194, 20 set. 2021.

FIGUEIREDO, F. S. D. Influência do teor de carbono sobre a integridade superficial de aços submetidos à operação de roleteamento. Dissertação de Mestrado – UFMG, 2019.

FISCHER, A., SCHOLTES, B., & NIENDORF, T. On the Influence of Surface Hardening Treatments on Microstructure Evolution and Residual Stress in Microalloyed Medium Carbon Steel. In Journal of Materials Engineering and Performance (Vol. 29, Issue 5, pp. 3040–3054). Springer, 2020.

GANGARAJI, S.M. H.; MORIDI, A.; GUAGLIANO, M.; GHIDINI, A.; BONIARDI, M. The effect of nitriding, severe shot peening and their combination on the fatigue behavior and micro-structure of a low-alloy steel. International Journal of Fatigue, p. 67-76, 2 maio 2013.

GANGARAJ, S.M. Hassani; MORIDI, A.; GUAGLIANO, M.; GHIDINI, A. Nitriding duration reduction without sacrificing mechanical characteristics and fatigue behavior: The beneficial effect of surface nano-crystallization by prior severe shot peening. Materials and Design, p. 492-498, 17 out. 2013.

GONÇALVES, Cristiane Sales; TSCHIPTSCHIN, André Paulo; HADDAD, Paulo. EFEITO DA TEMPERATURA NO ALÍVIO DE TENSÕES RESIDUAIS PRESENTES NA CAMADA NITRETADA*. 69º Congresso Nacional da ABM - International, São Paulo, p. 3478-3495, 25 jul. 2014.

HEINKE, W.; LEYLAND, A.; MATTHEWS, A.; BERG, G.; FRIEDRICH, C.; BROSZEIT, E. *Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests*. Thin Solid Films, V. 270, pp. 431-438, 1995.

HETTIG, M., & MEYER, D. Sequential multistage deep rolling under varied contact conditions. Procedia CIRP, 87, 291–296, 2020.

HETTIG, M., & MEYER, D. Microstructural influence of consecutive deep rolling of AISI 4140. Procedia CIRP, 108, 164–169, 2022.

HIRSCH, Thomas K.; ROCHA, Alexandre da Silva; RAMOS, Fabiano Dornelles; STROHAECKER, Telmo R. Residual Stress-Affected Diffusion during Plasma Nitriding

of Tool Steels. Metallurgical and Materials Transactions, v. 35, p. 3523-3530, 10 nov. 2004.

HOLMBERG, Kenneth; ERDEMIR, Ali. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. Friction, p. 263-284, 2017.

IVANISKI, T. M.; SOUZA, T. F.; ÉPP, J.; ROCHA, A. S. Constitutive modelling of high temperature flow behaviour for a low carbon high silicon bainitic steel. Materials Research, 23(5): e20200264, 2020.

KÄMMLER, J., WIELKI, N., & MEYER, D. Surface integrity after internal load oriented multistage contact deep rolling. Procedia CIRP, 71, 490–495 2018.

KANDIL, F. A.; LORD, J. D.; FRY, A. T.; GRANT, P. V. Review of Residual Stress Measurement Methods: A Guide to Technique Selection., National Physical Laboratory, Teddington Middlesex, 2001.

KLOCKE, F.; LIERMANN, J. Roller burnishing of hard turned surfaces. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 38, n. 5–6, p. 419–423, 1998.

KUMAR, D., IDAPALAPATI, S., WANG, W., & NARASIMALU, S. Effect of Surface Mechanical Treatments on the Microstructure-Property-Performance of Engineering Alloys. Materials, pag. 1–13 (2019).

KOBAYASHI, M.; MATSUI, T.; MURAKAMI†, Y. Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening. International Journal of Fatigue, v. 20, n. 5, p. 351-357, 1 abr. 1998.

KOLOZSVÁRY Z, PLASMATERM S.A., S.C., Tg-MURES, ROMANIA. Residual Stresses in Nitriding. In: Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM, 2002. p.209-219.

KOVACI, H.; HACISALIHOĞLU, I.; YETIM, A.F.; ÇELIK, A. Effects of shot peening pre-treatment and plasma nitriding parameters on the structural, mechanical and tribological properties of AISI 4140 low-alloy steel. Surface & Coatings Technology, p. 256-265, 17 nov. 2018.

KOVACÍ, H.; GHAHRAMANZADEH, H.; ALBAYRAK, Ç.; ALSARAN, A.; ÇELIK, A. EFFECT OF PLASMA NITRIDING PARAMETERS ON THE WEAR RESISTANCE OF ALLOY INCONEL 718. Metal Science and Heat Treatment, v. 57, n. 7, p. 470-474, 1 ago. 2016.

KRAUSS, G. Ferritic microstructures in continuously cooled low- and ultralow-carbon steels. ISIJ International, p. 937-945, 1995.

LI, YANG; ERDEMIR, Liang; SHEN, Dandan Zhang, Lie. The effect of surface nanocrystallization on plasma nitriding behaviour of AISI 4140 steel. Applied Surface Science, p. 979-984, 6 ago. 2010.

LI, X.; YUE, W.; WANG, C.; GAO, X.; WANG, S.; LIU, J.. Comparing tribological behaviors of plasma nitrided and untreated bearing steel under lubrication with phosphorand sulfur-free organotungsten additive. Tribology International, p. 47-53, 8 mar. 2012.

LIN, Yimin; LU, Jian; WANG, Liping; XU, Tao; XUE, Qunji. Surface nanocrystallization by surface mechanical attrition treatment and its effect on structure and properties of plasma nitrided AISI 321 stainless steel. *Surfaces and Coatings Technology*, p. 5599-5605, 9 ago. 2006.

LIU, J.; ZHANG, X.; CUI, Z.; AHMAD, T.; WANG, C.; HONG, N.; LIANG, T.; YANG, B.. Effects of ultrasonic surface rolling processing and plasma nitriding on the fretting wear behavior of Inconel 690TT. *Surfaces and Coatings Technology*, 18 ago. 2020.

LUCA, L.; NEAGU-VENTZEL, S.; MARINESCU, Effect of Working Parameters on Surface Finish in Ball-Burnishing of Hardened Steels. *Precision Engineering* v29. 2005.

LOH, N.H; TAM, S.C; MIYAZAWA, S. Statistical analyses of the effects of ball burnishing parameters on surface hardness. *Wear* 129, 1989.

LOH, N. L.; SIEW, L. W. Residual stress profiles of plasma nitrided steels. *Surface Engineering*, 15(2):137–142, 1999.

MACHERAUCH, Eckard. INTRODUCTION TO RESIDUAL STRESS. *Advances in Surface Treatments*, v. 4, 1987.

MACULOTTI, G.; GOTI, E.; GENTA, G.; MAZZA, L.; GALETTO, M. Uncertainty-based comparison of conventional and surface topography-based methods for wear volume evaluation in pin-on-disc tribological test. *Tribology International*, n. 165, p. 1-18, 8 set. 2021.

MANFRIDINI, Ana P. A.; GODOY, Cristina; WILSON, J.C. Avelar Batista; AUAD, Marcos V. Surface hardening of IF steel by plasma nitriding: Effect of a shot peening pre-treatment. *Surfaces and Coatings Technology*, p. 168-178, 7 out. 2014.

MAHBOUBI, F.; ABDOLVAHABI, K. The effect of temperature on plasma nitriding behavior of DIN 1.6959 low alloy steel. *Vacuum*, v. 81, n. 2, p. 239-243, 17 out. 2006

MARTINS M. A. Efeito dos parâmetros de torneamento e do roleteamento sobre a integridade superficial do aço ABNT 4140. 2019.

MENEZES, Marcela Rabelo; GODOY, Cristina; BUONO, V.T.L.; SCHVARTZMAN, Mônica M.M.; WILSON, J.C. Avelar-Batista. Effect of shot peening and treatment temperature on wear and corrosion resistance of sequentially plasma treated AISI 316L steel. *Surface & Coatings Technology*, p. 651-662, 12 dez. 2016.

MENEZES, V. M. Estudo Para Manufatura Energeticamente Eficiente De Engrenagens Através Do Emprego De Aço Bainítico De Resfriamento Contínuo. *Dissertação (Mestrado) - UFRGS*, 2021.

MOGHADDAM, Pouria Valizadeh; HARDELL, Jens; VUORINEN, Esa; CABALLERO, Francisca G.; SOURMAIL, Thomas; PRAKASH, Braham. The role of retained austenite in dry rolling/sliding wear of nanostructured carbide-free bainitic steels. *Wear*, n. 9, p. 446-447, 11 nov. 2019.

MOGHADDAM, P. V.; HARDELL, J; VUORINEN, E.; PRAKASH, B. Effect of retained austenite on adhesion-dominated wear of nanostructured carbide-free bainitic steel. *Tribology International*, n. 150, p. 1-14, 7 abr. 2020, a.

MOGHADDAM, P. V.; HARDELL, J; VUORINEN, E.; PRAKASH, B. Dry sliding wear of nanostructured carbide-free bainitic steels – Effect of oxidation-dominated wear. *Wear*, n. 454, p. 1-15, 15 maio 2020, b.

NAEEM, M.; DÍAZ-GUILLÉN, J.C. e.; KHALID, A.; FLORES , I. G.; ARROYO , R. M.; IQBAL , J.; SOUSA , RRM. Improved wear resistance of AISI-1045 steel by hybrid treatment of plasma nitriding and post-oxidation. *Tribology International*, n. 165, p. 1-18, 17 ago. 2022.

NANDA, T.; SINGH, V.; SINGH, V.; CHAKRABORTY, A.; SHARMA, S. Third generation of advanced high-strength steels: processing routes and properties. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 0: 1–30, 2016.

NORCINO, A. B., Uma contribuição ao estudo das tensões reiduais, *Dissertação de Mestrado*, 2013.

OHMOR, Y. Bainitic Transformations in Extremely Low Carbon Steels. *ISIJ international*, v. 35, n. 8, p. 962-968, 26 mar. 1995.

OLIVEIRA, A.M de; RIOFANO, R.M. Munoz; CARTELETTI, L.C.; TREMILIOSI, G.F.; BENTO, C.A.S. EFFECT OF THE TEMPERATURE OF PLASMA NITRIDING IN AISI 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL. *Revista Brasileira de Aplicações A Vácuo*, v. 22, n. 2, p. 63-66, 26 jul. 2003.

PANTAZOPOULOS, George. Liquid Nitriding of Steels. *In: ASM HandBook: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*. ASM In: 2013. p. 410-419.

PENG, T.; CHEN, Y.; LIU, X.; WU, M.; LU, Y.; HU, J. Phase constitution control of plasma nitrided layer and its effect on wear behavior under different loads. *Surfaces and Coatings Technology*, v. 403, p. 1-5, 10 set. 2020.

PEROZZO, T. S. Análise da influência dos parâmetros de processo no processamento termomecânicos de aços bainíticos por dilatometria. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019. 81 p.

PIES, H. J; DALKE, A. Case Structure and Properties of Nitrided Steels. *In: COMPRESSIVE Materials Processing*, 2014. v. 12, cap. 12, p. 439-488.

PYE, David. *Practical NITRIDING and Ferritic Nitrocarburizing: ASM International Technical Bool Committee*, 2003. 260 p.

POHRELYUK, I.M.; SHEYKIN, S.E.; PADGURSKAS, J.; LAVRYS, S.M. Wear resistance of two-phase titanium alloy after deformation-diffusion treatment. *Tribology International*, p. 404-411, 22 jun. 2018.

PRABHUDEV, K. H. *Handbook of Treatment of Steels: Fundamentos e Aplicações: TATA McGraw-Hill Publishing Company Limited*, 1988.

RAMOS, Fabiano Dornelles. A INFLUÊNCIA DAS TENSÕES SOBRE A DIFUSÃO DE NITROGÊNIO NO PROCESSO DE NITRETAÇÃO A PLASMA. 2003. 96 p. D (Mestrado) - UFRGS, Porto Alegre, 2003.

REIS, T. M.; DOTTA, A. L. B.; STUDENY, Z.; FARIAS, M. C. M.; GASPARIN, A. L. Tribological evaluation of duplex treatment of plasma nitriding/ oxidation applied to injection mold extraction system. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, ano 4, v. 17, p. 1-7, 6 jul. 2020.

REIS, W., FONSECA, M. P., CHUVAS, T. C., OLIVEIRA, L. C., Estudo das tensões residuais geradas no aço AISI 4340.

REMENTERIA, R.; MATEO, C. G.; CABALLERO, F. G. New Insights into carbon distribution in bainitic ferrite. *Bainite – from nano to macro*, Symposium on science and application of Bainite, v. 1, p. 12-20, jun. 2017.

REZENDE A.B., 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* 456 (2020), 203377.

RIBEIRO, João Carlos Rodrigues dos Santos. Análise de Tensões Residuais e Deformações em Soldadura. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Nova Lisboa Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.

RICHARDS, M. D., MATLOCK D. K., SPEER J. G. Deep Rolling Response of Notched Medium Carbon Bar Steels. *SAE Technical Papers Series*, 01-2004.

ROCHA, A. da S. Estudo da Nitretação Iônica Aplicada aos Aços Rápidos. 96 p. Dissertação (Mestrado) - UFRGS, Porto Alegre, 1996.

ROCHA, A. da S. Influência do Estado Superficial Prévio na Nitretação a Plasma do Aço AISI M2. 198 p. Tese (Doutorado) - UFRGS, Porto Alegre, 2000.

ROCHA, A da S., T. HIRSCH, Effect of different surface states before plasma nitriding on properties and machining behavior of M2 high-speed steel. *Surfacte and Coatings technology* 165 (2), 2003.

ROCHA, R. S. “Avaliação do alívio mecânico de tensões residuais devido à sobre carga provocada por teste hidrostático”. Dissertação de Mestrado, *UFRGS*, 2009.

RODRÍGUEZ, A., LÓPEZ DE LACALLE, L. N., CELAYA, A., FERNÁNDEZ, A., & LAMIKIZ, A. Ball burnishing application for finishing sculptured surfaces in multi-axis machines. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 4(3–4), 220–237 (2011).

RODRÍGUEZ, A. et al. Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surface and Coatings Technology*, v. 206, n. 11–12, p. 2817–2824, 2012.

ROELOFS, H.; LEMBKE, M. I. Taming the bainite for use in bright bar applications. *Bainite – from nano to macro*, Symposium on science and application of Bainite, v. 1, p. 43-51, jun. 2017.

RÖSCH, O. Development and Application of high Strength Bainitic Forging Steel. Bainite – from nano to macro, Symposium on science and application of Bainite, v. 1, p. 43-51, 1 jun. 2017

ROSSINI, N. S.; DASSISTI, M.; BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials and Design*, v. 35, p. 572-588, 10 jul. 2011.

SARTKULVANICH, P. Determination of material properties for use in FEM simulations of machining and roller burnishing. The Ohio State University, 2007. Dissertação.

SARTKULVANICH, P., ALTAN, T., JASSO, F., & RODRIGUEZ, C. Finite element modeling of hard roller burnishing: An analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129(4), 705–716, 2007.

SATYAPAL, M.; KHANNA, A.S.; JOSEPH, Alphonsa. Effect of Temperature on the Plasma Nitriding of Duplex Stainless Steels. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, v. 2, p. 2017-222, 2 maio 2013.

SCHULZE, V. Modern Mechanical Surface Treatment. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2006.

SEEMIKERI, C. Y., BRAHMANKAR, P. K., & MAHAGAONKAR, S. B. Investigations on surface integrity of AISI 1045 using LPB tool. *Tribology International*, 41(8), 724–734, 2008.

SHANKAR, R. Ravi; SARAVANAN, R.; SENTHIL, J. Experimental Investigation of Metallurgical Behaviors of Liquid, Gas & Plasma Nitrided Steel. National Conference on Recent trends in Mechanical Engineering, p. 88-98, 17 out. 2014.

SHEN, Lie; WANG, Liang; WANG, Yizuo; WANG, Chunhua. Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot peening. *Surface & Coatings Technology*, p. 3222-3227, 21 mar. 2010.

SILVA, Mateus Alves da; JUNIOR, Mario Wolfart; ROCHA, Alexandre da Silva; TURRA, Cristiano José. Quantificação de constituintes M-A através de metalografia colorida em aço bainítico livre de carbonetos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.8, n.3, p.20348-20359, mar., 2022.

SILVEIRA, A. C. F , Estudo para Aplicação do Aço Bainítico de Resfriamento Contínuo DIN18MnCrSiMo6-4 em Forjamento a Quente, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019, 104 p.

SILVEIRA, A. C. F.; BEVILAQUA, W. L.; DIAS, V. W.; CASTRO, P. J.; EPP, J.; ROCHA, A. S. Influence of hot forging parameters on a low carbon continuous cooling bainitic steel microstructure. *Metals*, 10(5): 601, 2020.

SINGH, Gajendra Prasad; ALPHONSA, J.; BARHAI, P.K.; RAYJADA, P.A.; MUKHERJEE, S. Effect of surface roughness on the properties of the layer formed on

- AISI 304 stainless steel after plasma nitriding. *Surfaces and Coatings Technology*, p. 5807-5811, 24 ago. 2005.
- SINGH, Kritika; RATHORE, Sudharm; SINGH, Aparna. Evolution of sub-surface microstructure under linear reciprocating wear of nanostructured bainitic steel. *Materials Characterization*, n. 180, p. 1-12, 27 ago. 2021.
- SMAIL, R.; PRASETYO, D. I.; TAUVIQIRRAHMAN, M.; YOHANA, E; BAYUSENO, A. P. Induction Hardening of Carbon Steel Material: The Effect of Specimen Diameter. *Advanced Materials Research*, v. 911, p. 210-214, 24 mar. 2014.
- SOUSA, D. A. de. Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza. 2012. Dissertação (Mestrado) - UFSJ, 2012.
- SOURMAIL T. Bainite and superbainite in long products and forged applications. *HTM - Journal of Heat Treatment and Materials*. 2017;72(6):371-8.
- SOMERS M. A. J., MITTEMEIJER E. J., “Development and Relaxation of Stress in Surface Layers; Composition and Residual Stress Profiles in gamma line layers on Fe alfa Substrates”, Heat Treatment, Nitriding and Nitrocarburizing, AWT Seminar, Darmstadt, 1991.
- SPECTRUMA ANALYTIC - GDOES Theory. Disponível em: <https://www.spectrumba.de/en/gdoes-theory.html>. Acessado em 13 de maio de 2023.
- STANFORD, M. K. Friction and Wear of Unlubricated NiTiHf with Nitriding Surface Treatments. National Aeronautics and Space Administration, p. 1, 1 fev. 2018.
- SUIKKANEN, P. DEVELOPMENT AND PROCESSING OF LOW CARBON BAINITIC STEELS. 2009. 486 p. Dissertação (Mestrado) - Faculty of Technology of the University of Oulu, 2009.
- SUNDAR, R., GANESH, P., GUPTA, R. K., RAGVENDRA, G., PANT, B. K., KAIN, V., RANGANATHAN, K., KAUL, R., & BINDRA, K. S. (2019). Laser Shock Peening and its Applications: A Review. In *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* (Vol. 6, Issue 4).
- TABATABAEIAN, Ali; REZA GHASEMI, Ahmad; SHOKRIEH, Mahmood M.; MARZBANRAD, Bahareh; BARAHENI, Mohammad; FOTOUHI, Mohammad. Residual Stress in Engineering Materials: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 2021.
- TADI, A. Jafari; HOSSEINI, S. R.; SEMIROMI, M. Naderi. Influence of surface nano/ultrafine structure formed via pre-deep rolling process on the plasma nitriding characteristics of the AISI 316L stainless steel., 2017.
- TADI, A. J.; HOSSEINI, S. R.; S'EMIROMI, M. N. Influence of surface nano/ultrafine structure Achivied by Deep Rolling Process on Plasma Nitriding and Tribological Properties of the AISI 316L Stainless Steel. *Iranian Journal os Materials Science & Engineering*, v. 14, n. 3, p. 1, 1 set. 2017.
- TANG, Lei; JIA, Weiju; HU, Jing. An enhanced rapid plasma nitriding by laser shock peening. *Materials Letters*, p. 91-93, 6 ago. 2018.

TOBOŁA, D.; KANIA, B. Phase composition and stress state in the surface layers of burnished and gas nitrided Sverker 21 and Vanadis 6 tool steels. *Surfaces and Coatings Technology*, p. 105-115, 24 ago. 2018.

TOBOŁA, D.; MORGIEL, J.; MAJ, Ł. TEM analysis of surface layer of Ti-6Al-4V ELI alloy after slide burnishing and low-temperature gas nitriding. *Applied Surface Science*, p. 1-11, 4 abr. 2020.

TOBOŁA, D. Influence of sequential surface treatment processes on tribological performance of Vanadis 6 cold work tool steel. *Wear*, p. 488, 1 out. 2021.

TURRA, C. J, Caracaterização Mecânica e Metalúrgica de um Aço Bainítico de Resfriamento Contínuo Aplicado no Processo Industrial de Forjamento a Quente, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021, 104 p.

UNAL, O.; MALEKI, E.; VAROL, R. The effect of surface nanocrystallization on plasma nitriding behaviour of AISI 4140 steel. *Applied Surface Science*, p. 979-984, 6 ago. 2010.

UNAL, O.; MALEKI, E.; VAROL, R. Effect of severe shot peening and ultra-low temperature plasma nitriding on Ti-6Al-4V alloy. *Vacuum*, n. 150, p. 69-78, 31 jan. 2018.

UNAL, O.; MALEKI, E.; VAROL, R. Plasma nitriding of gradient structured AISI 304 at low temperature: Shot peening as a catalyst treatment. *Vacuum*, p. 194-197, 16 mar. 2019.

WANG, S.; LI, Y.; YAO, M.; WANG, R. Compressive residual stress introduced by shot peening, *Journal of Materials Processing Technology*, n. 73, p. 64-73, 1 abr. 1998.

WANG, S. C. et al. - "The effect of alloying elements on the structure and mechanical properties of ultralow carbon bainitic steels". IN: China Steel Technical Report, n. 6, 1992, pp 1 - 9.

WANG, K. Microstructure-property relationship in bainitic steel: The effect of austempering. *Materials Science & Engineering A*, p. 120-127, 9 ago. 2016.

WINTER, K. M.; KALUCKI, J.; KOSHEL, D. Process technologies for thermochemical surface engineering. *Termomechanical Surface Engineering of Steels*, v. 20, n. 2, p. 141-206, 17 out. 2015.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H. Residual stress Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, v. 17, p. 355-365, 1 abr. 2001, a.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H. Residual stress Part 2 – Nature and origins. *Materials Science and Technology*, v. 17, p. 366-375, abr. 2001, b.

WOLFART JUNIOR, Mario. Nitretação a Plasma do Aço ABNT 316L em Baixas Temperaturas. 2002. Tese (Doutorado) - UFRGS, Porto Alegre, 2002.

WU, Jizhan; WEI, Peitang; ZHANG, Xiuhua; HE, Zhiqiang; DENG, Guanyu. Evaluation of pre-shot peening on improvement of carburizing heat treatment of AISI 9310 gear steel. *Journal of Materials Research and Technology*, p. 2784-2796, 1 abr. 2022.

XAVIER, M. D. A morfologia da Bainita. *Researchgate*, p. 25, 1 jan. 2009.

YANG, Mei. Nitriding – fundamentals, modeling and process optimization. Tese (Doutorado) - Faculty of the Worcester Polytechnic Institute, ASM In, 2012.

ZHENYAO, S.; ZHICHAO, W.; ZHUANG, L.; SHUAI, W.; JIJIE, W. Effect of thermomechanical processing on the microstructure and mechanical properties of low carbon steel. In: 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, 1984–1989, 2015.