

MODIFICAÇÃO SUPERFICIAL DE AÇOS BAINÍTICOS DE RESFRIAMENTO CONTÍNUO: FUNDAMENTOS E PERSPECTIVAS DA COMBINAÇÃO ENTRE *SHOT PEENING* E NITRETAÇÃO A PLASMA

Frederico Murilo Wlassak (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) E-mail: frederico.wlassak@ufrgs.br

Alexandre da Silva Rocha (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) E-mail: alexandre.rocha@ufrgs.br

Mario Wolfart Junior (Instituto Federal Catarinense) E-mail: mario.wolfart@ifc.edu.br

Resumo: Os aços bainíticos de resfriamento contínuo permitem combinar elevada resistência mecânica e simplificação do ciclo de fabricação de componentes forjados, mas aplicações sujeitas a desgaste podem exigir modificações adicionais da região superficial. Este trabalho apresenta uma revisão narrativa técnico-científica, complementada por busca bibliográfica estruturada, sobre os fundamentos e as perspectivas da aplicação sequencial de *shot peening* e nitretação a plasma nesses materiais. A análise distingue evidências obtidas diretamente no aço DIN 18MnCrSiMo6-4 de resultados provenientes de materiais contendo bainita produzida por outras rotas e de outras classes de aços submetidas à sequência de tratamentos. Os estudos realizados diretamente no DIN 18MnCrSiMo6-4 demonstram que temperatura, tempo e composição da atmosfera de nitretação modificam a constituição e a profundidade da camada, a dureza, as tensões residuais e a resposta tribológica. Entretanto, não foram identificados estudos indexados que aplicassem diretamente *shot peening* seguido de nitretação a plasma a aços bainíticos de resfriamento contínuo. Em outros aços, o pré-tratamento mecânico produziu respostas distintas, incluindo aumento da profundidade nitretada e redução do desgaste em determinadas condições, mas também menor incorporação de nitrogênio e pior desempenho tribológico em outras. Esses resultados indicam que a resposta da sequência depende da interação entre deformação superficial, tensões residuais, microestrutura, topografia e condições da nitretação. Conclui-se que a aplicação da sequência aos aços bainíticos de resfriamento contínuo ainda requer validação experimental direta, com caracterização integrada da integridade superficial após cada etapa.

Palavras-chave: aço bainítico; *shot peening*; nitretação a plasma; integridade superficial; desgaste.

SURFACE MODIFICATION OF CONTINUOUSLY COOLED BAINITIC STEELS: FUNDAMENTALS AND PERSPECTIVES OF COMBINED SHOT PEENING AND PLASMA NITRIDING

Abstract: Continuously cooled bainitic steels can combine high mechanical strength with a simplified manufacturing route for forged components, but applications subjected to wear may require additional modification of the surface region. This work presents a technical-scientific narrative review, complemented by a structured literature search, on the fundamentals and perspectives of sequential *shot peening* and plasma nitriding applied to these materials. The analysis distinguishes evidence obtained directly for DIN 18MnCrSiMo6-4 steel from results reported for bainitic materials produced by other metallurgical routes and for other steel classes subjected to sequential treatments. Studies performed directly on DIN 18MnCrSiMo6-4 demonstrate that nitriding temperature, time, and gas composition affect layer constitution and depth, hardness, residual stresses, and tribological response. However, no indexed studies were identified in which *shot peening* followed by plasma nitriding was directly applied to continuously cooled bainitic steels. In other steels, mechanical pre-treatment produced contrasting responses, including increased nitrided depth and reduced wear under some conditions, but also lower nitrogen uptake and poorer tribological performance under others. These results indicate that the response to sequential treatment depends on the interaction among surface deformation, residual stresses, microstructure, topography, and nitriding conditions. It is concluded that application of this sequence to continuously cooled bainitic steels still requires direct experimental validation, with integrated characterization of surface integrity after each processing step.

Keywords: bainitic steel; shot peening; plasma nitriding; surface integrity; wear.

1. INTRODUÇÃO

A busca por componentes mecânicos com elevada resistência e maior eficiência de processamento tem ampliado o interesse por aços capazes de desenvolver suas propriedades durante o próprio ciclo de conformação. Nesse contexto, os aços bainíticos de resfriamento contínuo são empregados em componentes forjados por permitirem que a transformação

bainítica ocorra durante o resfriamento após a conformação a quente, reduzindo ou eliminando etapas posteriores de reaquecimento, têmpera e revenimento (BLECK et al., 2017; BEVILAQUA et al., 2020; DE CASTRO et al., 2021). Entre esses materiais, o DIN 18MnCrSiMo6-4 apresenta microestrutura predominantemente bainítica e tem sido investigado em aplicações nas quais elevada resistência mecânica deve ser conciliada com ductilidade e estabilidade dimensional (DALCIN et al., 2019; TURRA, 2021).

Embora essas propriedades sejam adequadas para diferentes aplicações estruturais, condições tribológicas severas podem exigir modificações adicionais da região superficial. Entre os processos empregados para esse fim, o *shot peening* introduz deformação plástica localizada, encruamento e tensões residuais predominantemente compressivas, enquanto a nitretação a plasma promove incorporação de nitrogênio e desenvolvimento de uma região endurecida constituída por zona de compostos e zona de difusão (SCHULZE, 2006; AGHAJANI; BEHRANGI, 2017). A aplicação sequencial desses tratamentos é particularmente relevante porque o estado produzido pelo tratamento mecânico — incluindo topografia, deformação, microestrutura e tensões residuais — passa a constituir a condição inicial da nitretação. Consequentemente, os efeitos da sequência não podem ser interpretados como a simples soma das modificações produzidas por cada processo isoladamente.

A evidência disponível, entretanto, apresenta diferentes níveis de relação com os aços bainíticos de resfriamento contínuo. Para o DIN 18MnCrSiMo6-4, estudos experimentais demonstram diretamente os efeitos da temperatura, do tempo e da composição gasosa da nitretação a plasma sobre a formação da camada, a dureza, as tensões residuais e o comportamento tribológico (DALCIN et al., 2020a; DALCIN et al., 2020b; DALCIN et al., 2021; DALCIN et al., 2022). Os efeitos do *shot peening* sobre microestruturas bainíticas foram avaliados em materiais obtidos por outras rotas metalúrgicas (HAN et al., 2020; TIWARI; ORAON; VARSHNEY, 2026). A aplicação sequencial de *shot peening* e nitretação a plasma foi investigada principalmente em outras classes de aços, como AISI 4140, aço IF estabilizado ao Ti e aços inoxidáveis austeníticos (SHEN et al., 2010; MANFRIDINI et al., 2014; BIEHLER; HOCHÉ; OECHSNER, 2017; KOVACI et al., 2019).

Diante dessa lacuna, este trabalho apresenta uma revisão narrativa técnico-científica dos fundamentos envolvidos na combinação entre *shot peening* e nitretação a plasma, com ênfase em sua perspectiva de aplicação aos aços bainíticos de resfriamento contínuo. A análise distingue resultados obtidos diretamente nesses materiais daqueles provenientes de materiais contendo bainita produzida por outras rotas e de outras classes de aços submetidas à sequência de tratamentos. Busca-se, assim, relacionar as modificações de microestrutura, topografia e estado de tensões produzidas pelo pré-tratamento mecânico com a resposta à nitretação e o comportamento tribológico, identificando tanto os mecanismos potencialmente favoráveis quanto as limitações para sua transferência ao DIN 18MnCrSiMo6-4.

2. METODOLOGIA DA REVISÃO

Este trabalho foi desenvolvido como uma revisão narrativa técnico-científica. O levantamento bibliográfico original foi realizado de forma dirigida por meio de consultas à plataforma ScienceDirect, ao ResearchGate e ao mecanismo de busca Google, complementadas pela análise de dissertações, teses e das referências dos trabalhos considerados pertinentes. Como essa etapa inicial não seguiu um protocolo sistemático de seleção, não foram registrados quantitativos formais de todos os documentos recuperados e excluídos.

Para atualização da literatura e verificação das lacunas identificadas durante a elaboração do manuscrito, foi realizada posteriormente uma busca bibliográfica estruturada na base Scopus. Não foi estabelecido limite inferior de publicação, sendo considerados os documentos disponíveis até a última busca, realizada em 16 de setembro de 2026. Foram utilizadas

combinações, em inglês, dos termos *shot peening*, *severe shot peening*, *plasma nitriding*, *ion nitriding*, *bainite*, *bainitic steel*, *continuous cooling bainitic steel*, *continuously cooled bainitic steel*, *18MnCrSiMo6-4*, *HSX 130HD* e *HSX XTP*. As consultas foram organizadas para identificar separadamente estudos de *shot peening* em materiais contendo bainita, estudos envolvendo a sequência entre *shot peening* e nitretação assistida por plasma e trabalhos referentes especificamente aos aços de resfriamento contínuo.

A busca destinada a identificar trabalhos envolvendo *shot peening* em materiais contendo bainita recuperou 27 documentos. Após a avaliação de títulos e resumos, 13 foram considerados potencialmente pertinentes. Cinco puderam ser avaliados integralmente, dos quais quatro apresentaram relação direta com o objeto da busca; um foi excluído após a leitura completa e oito não puderam ser avaliados integralmente por indisponibilidade do texto completo. A busca ampla envolvendo *shot peening* e nitretação a plasma ou iônica recuperou 73 documentos. Esses registros foram examinados quanto à aplicação efetivamente sequencial dos dois tratamentos no mesmo material e à disponibilidade de informações sobre processamento e resposta superficial. Como essa busca teve caráter complementar dentro de uma revisão narrativa, não foram registrados quantitativos intermediários de exclusão para os 73 documentos. Quatro trabalhos que permitiam analisar diretamente a sequência foram incorporados à síntese comparativa, correspondentes aos estudos de Shen et al. (2010), Manfridini et al. (2014), Biehler, Hoche e Oechsner (2017) e Kovacı et al. (2019).

A matriz comparativa final foi composta por dez estudos: quatro trabalhos de nitretação a plasma realizados diretamente no DIN 18MnCrSiMo6-4, dois estudos de *shot peening* em materiais contendo bainita obtida por outras rotas e quatro estudos da aplicação sequencial de *shot peening* e nitretação em outras classes de aços.

Foram incluídos trabalhos experimentais que permitissem analisar pelo menos um dos seguintes aspectos: resposta de aços bainíticos de resfriamento contínuo à nitretação; resposta de microestruturas bainíticas ao *shot peening*; aplicação sequencial de *shot peening* e nitretação a plasma em materiais ferrosos; ou mecanismos necessários à interpretação das interações entre deformação, tensões residuais, topografia e transporte de nitrogênio. Estudos envolvendo outras modalidades de deformação severa ou outras técnicas de nitretação foram utilizados apenas como suporte mecanístico quando pertinentes, não sendo tratados como evidência diretamente equivalente à sequência analisada. Foram excluídos da comparação principal trabalhos sem descrição suficiente das condições de processamento ou nos quais não fosse possível estabelecer a relação entre tratamento e resposta superficial.

Para os estudos selecionados foram registrados, quando disponíveis, material e condição metalúrgica inicial, modalidade e parâmetros de *shot peening*, condições de nitretação, características da camada modificada, dureza, tensões residuais, topografia e condições dos ensaios tribológicos. As evidências foram então interpretadas segundo sua relação com o objeto da revisão, distinguindo resultados obtidos diretamente em aços bainíticos de resfriamento contínuo, resultados obtidos em materiais contendo bainita produzida por outras rotas e resultados da sequência em outras classes de aços. Devido à heterogeneidade de materiais, processos e métodos de caracterização, os valores experimentais foram comparados apenas dentro do contexto de cada estudo, não sendo realizada meta-análise ou comparação quantitativa direta entre condições experimentais não equivalentes.

3. MATERIAIS E PROCESSOS DE MODIFICAÇÃO SUPERFICIAL

3.1 Aços bainíticos de resfriamento contínuo

Os aços bainíticos de resfriamento contínuo são desenvolvidos para que a transformação bainítica ocorra durante o resfriamento após a conformação a quente, reduzindo ou

eliminando etapas posteriores de reaquecimento, têmpera e revenimento. A microestrutura obtida depende da composição química, do histórico de deformação e da taxa de resfriamento, podendo apresentar diferentes morfologias de ferrita bainítica e constituintes secundários. Diferentemente das classificações de bainita superior e inferior originalmente associadas à transformação isotérmica, o resfriamento contínuo pode produzir microestruturas mais heterogêneas, cuja constituição e morfologia variam ao longo do intervalo de transformação (BRAMFITT; SPEER, 1990; BLECK et al., 2017).

O DIN 18MnCrSiMo6-4, comercialmente denominado HSX 130HD, é um aço bainítico de baixo carbono e média liga desenvolvido para esse tipo de processamento. Turra (2021) caracterizou o material na condição de barras laminadas a quente e resfriadas naturalmente ao ar. A composição determinada por espectrometria na UFRGS é apresentada na Tabela 1. O teor de Si contribui para restringir a precipitação de carbonetos durante a transformação bainítica, enquanto Mn, Cr e Mo participam do controle da temperabilidade e da cinética das transformações durante o resfriamento (TURRA, 2021).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Fe
0,18	1,12	1,53	0,01	0,02	0,13	1,2	0,12	0,23	Balanço

Tabela 1: Composição química do aço DIN 18MnCrSiMo6-4 (%-massa). Fonte: Turra (2021).

Na condição avaliada, o material apresentou limite de escoamento de 673 MPa, limite de resistência de 983 MPa e alongamento de 18,7%. A microestrutura das barras não era homogênea: foram observadas bandas de segregação associadas a regiões bainíticas mais refinadas, resultantes de maiores graus prévios de deformação, além de regiões ferríticas distribuídas na microestrutura (TURRA, 2021). Essa condição é relevante para tratamentos superficiais porque regiões com diferentes morfologias, durezas e capacidades de deformação não respondem necessariamente da mesma forma aos impactos do *shot peening* nem constituem um substrato uniforme para a nitretação subsequente.

A influência da condição microestrutural sobre o *shot peening* é observada em materiais bainíticos obtidos por outras rotas. Em AISI 5160 austemperado, Han et al. (2020) verificaram maior endurecimento superficial nas condições bainíticas inicialmente mais macias, enquanto o efeito foi menor nas condições de maior dureza, demonstrando a dependência da resposta em relação à morfologia bainítica e ao estado mecânico inicial.

Esses resultados indicam que morfologia, escala das unidades bainíticas, presença de constituintes metaestáveis e densidade inicial de defeitos condicionam a resposta à deformação superficial. No aço estudado por Tiwari, Oraon e Varshney (2026), o refinamento das ripas bainíticas e o aumento da densidade de discordâncias foram acompanhados por elevação da dureza superficial, enquanto *enquanto a fração de austenita retida diminuiu durante o shot peening, comportamento associado à transformação induzida por deformação em martensita*. Diferenças na dureza e na escala microestrutural alteram a capacidade de acomodação plástica e, conseqüentemente, o encruamento e o campo de tensões residuais produzidos pelo tratamento. A densidade de discordâncias e a quantidade de interfaces são igualmente relevantes para a nitretação, pois modificam os sítios disponíveis para interação com o nitrogênio; entretanto, seu efeito sobre o transporte depende também do estado de tensões, da composição e da temperatura. Como Han et al. (2020) e Tiwari, Oraon e Varshney (2026) estudaram materiais bainíticos obtidos por austêmpera, esses resultados são empregados nesta revisão como evidência mecanística, e não como demonstração direta do comportamento do DIN 18MnCrSiMo6-4.

3.2 Shot peening como pré-tratamento

O *shot peening* é um processo de modificação mecânica superficial baseado no impacto

repetido de partículas contra a superfície do componente. A deformação plástica localizada produzida pelos impactos, restringida pelo material subsuperficial, promove encruamento e o desenvolvimento de tensões residuais predominantemente compressivas. A resposta obtida depende das características do meio de jateamento e das condições de processo, incluindo material, dureza e tamanho das partículas, velocidade de impacto, ângulo de incidência, tempo de exposição e propriedades mecânicas do substrato (SCHULZE, 2006; MIAO et al., 2010; CHEN et al., 2019).

Entre os parâmetros empregados para controle do processo, destacam-se a intensidade Almen e a cobertura. A intensidade Almen constitui uma medida indireta da severidade do tratamento, determinada a partir da deformação produzida em uma lâmina padronizada, enquanto a cobertura representa a fração da superfície atingida pelas endentações. O aumento da intensidade tende a elevar a energia transferida por impacto e pode ampliar a profundidade da região deformada e do campo de tensões residuais compressivas. Entretanto, uma mesma intensidade Almen pode ser obtida por diferentes combinações de tamanho, material e velocidade das partículas, sem que o estado superficial resultante seja necessariamente equivalente. De modo semelhante, o aumento da cobertura promove maior sobreposição dos impactos e deformação acumulada, mas exposições excessivas podem elevar a rugosidade e favorecer a formação de defeitos superficiais associados ao *overpeening* (MIAO et al., 2010; BAGHERIFARD; GHELICHI; GUAGLIANO, 2012; LLANEZA; BELZUNCE, 2015).

As diferentes modalidades de deformação superficial por impacto não devem ser consideradas equivalentes. No *shot peening* convencional, os parâmetros são selecionados principalmente para produzir encruamento e tensões residuais compressivas sem impor deformação superficial excessiva. O *severe shot peening* utiliza condições de maior severidade e deformação acumulada, podendo promover alterações microestruturais mais intensas. Processos centrífugos e vibratórios diferem ainda na forma de aceleração e movimentação das partículas, enquanto técnicas como *surface mechanical attrition treatment* apresentam condições de carregamento distintas das empregadas no *shot peening* convencional. Resultados obtidos por essas rotas podem contribuir para a compreensão dos efeitos da deformação intensa, mas não devem ser transferidos diretamente entre processos sem considerar as respectivas condições de impacto.

O refinamento microestrutural também não constitui uma consequência necessária do *shot peening*. Em condições convencionais, o tratamento pode produzir aumento da densidade de discordâncias, encruamento e subdivisão da estrutura sem formação de uma camada nanocristalina. Estruturas ultrafinas ou nanométricas são observadas principalmente sob condições de maior severidade e dependem tanto da energia e quantidade de impactos quanto da capacidade do material de acumular deformação plástica (BAGHERIFARD et al., 2016). Em materiais contendo constituintes metaestáveis, o tratamento pode ainda promover transformações induzidas por deformação, como observado para austenita retida em determinados aços bainíticos (TIWARI; ORAON; VARSHNEY, 2026). Assim, ao ser empregado como pré-tratamento da nitretação, o *shot peening* deve ser considerado pelo estado efetivamente produzido na superfície; deformação, tensões residuais, microestrutura e topografia, e não apenas pela identificação nominal do processo.

3.3 Nitretação a plasma

A nitretação a plasma é um tratamento termoquímico no qual espécies ativas de nitrogênio, geradas em uma descarga luminescente, interagem com a superfície do substrato por mecanismos que envolvem bombardeamento iônico, *sputtering*, adsorção e difusão. Em aços ferríticos e bainíticos, o tratamento pode produzir uma camada de compostos constituída principalmente pelos nitretos de ferro $\epsilon\text{-Fe}_2\text{-}_3\text{N}$ e $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$, seguida por uma zona de difusão

contendo nitrogênio em solução sólida e precipitados associados aos elementos de liga (AGHAJANI; BEHRANGI, 2017). A constituição, a espessura e as propriedades dessas regiões dependem da composição e da condição microestrutural do aço, além da temperatura, do tempo, da composição gasosa, da pressão e dos parâmetros elétricos empregados no tratamento.

Esse comportamento deve ser distinguido daquele observado em aços inoxidáveis austeníticos nitretados em baixas temperaturas. Nesses materiais, a supersaturação de nitrogênio na austenita pode produzir austenita expandida, também denominada fase S; sua formação está associada à matriz austenítica e não representa a estrutura típica da camada formada em aços ferríticos ou bainíticos. Shen et al. (2010), por exemplo, identificaram fase S em AISI 304 nitretado a 410 e 480 °C, enquanto temperaturas superiores favoreceram a precipitação de CrN. Assim, resultados relacionados à fase S e à transformação de austenita em martensita induzida por deformação são utilizados nesta revisão como evidência mecanística da influência da pré-deformação, mas não podem ser transferidos diretamente para o DIN 18MnCrSiMo6-4.

A comparação entre diferentes condições de nitretação requer considerar conjuntamente os parâmetros do processo. Nos experimentos de Dalcin et al. (2020a), o DIN 18MnCrSiMo6-4 foi nitretado com 76 vol.% N₂ e 24 vol.% H₂, a 300 Pa, nas temperaturas de 400, 450, 500 e 550 °C e por 3, 6 e 9 h. As amostras foram previamente preparadas e submetidas à limpeza por *sputtering* antes do tratamento. A potência eficaz empregada variou entre 0,9 e 1,6 kVA, de acordo com a temperatura e o tempo. Em estudo complementar, Dalcin et al. (2020b) mantiveram a temperatura em 500 °C e avaliaram misturas contendo 5, 24 e 76 vol.% N₂ pelos mesmos tempos, empregando 400 Pa para a atmosfera com 5 vol.% N₂ e 300 Pa para as demais, com potência eficaz entre 0,9 e 1,3 kVA. Nos ensaios posteriormente descritos por Dalcin et al. (2021), a densidade de corrente aumentou de $2,0 \pm 0,06$ mA/cm² a 400 °C para $2,9 \pm 0,06$ mA/cm² a 550 °C. Para os tratamentos realizados a 500 °C com 5, 24 e 76 vol.% N₂, Dalcin et al. (2022) reportaram densidades de corrente de $1,8 \pm 0,21$, $2,1 \pm 0,21$ e $2,4 \pm 0,10$ mA/cm², respectivamente. Esses resultados mostram que temperatura, tempo, composição gasosa, pressão e parâmetros elétricos devem ser considerados conjuntamente na comparação das condições de nitretação.

A resposta do DIN 18MnCrSiMo6-4 evidencia essa dependência. A 500 °C e 76 vol.% N₂, o aumento do tempo de 3 para 9 h elevou a espessura da camada de compostos de $4,3 \pm 0,2$ para $8,2 \pm 0,2$ µm e a profundidade total da camada nitretada de $139,2 \pm 30,3$ para $245,4 \pm 40,3$ µm. A maior dureza superficial nesse conjunto, $1294,8 \pm 107,8$ HV0,1, foi obtida após 6 h, mostrando que o aumento do tempo não produz necessariamente aumento monotônico da dureza (Dalcin et al., 2020b). Na comparação entre atmosferas após 9 h, a redução de 76 para 24 e 5 vol.% N₂ diminuiu a camada de compostos de $8,2 \pm 0,2$ para $3,9 \pm 0,2$ e $0,7 \pm 0,3$ µm, respectivamente. As profundidades totais correspondentes foram $245,4 \pm 40,3$, $223,3 \pm 27,5$ e $172,7 \pm 22,4$ µm (Dalcin et al., 2020b).

O efeito da temperatura também deve ser interpretado em relação à estabilidade térmica do substrato. Nos experimentos de Dalcin et al. (2020a), 550 °C favoreceu maiores profundidades de nitretação, mas foi acompanhado por redução da dureza do núcleo; dessa forma, o aumento da temperatura não pode ser associado genericamente a maior desempenho. Para esse aço e para o conjunto de condições avaliadas, 500 °C representou um compromisso entre desenvolvimento da camada e preservação das propriedades do substrato. Essa temperatura não constitui, entretanto, uma condição ótima universal; sua seleção depende da composição do material, do tempo, da atmosfera e das propriedades requeridas para a aplicação.

3.4 Integridade superficial em tratamentos sequenciais

Em processos sequenciais, a resposta funcional depende do estado superficial produzido pelo conjunto das etapas, e não apenas de propriedades isoladas. O conceito de integridade superficial reúne características geométricas e metalúrgicas da região superficial, incluindo topografia, dureza, microestrutura e tensões residuais (TOBOŁA, 2022). Essa abordagem é particularmente relevante para a aplicação de *shot peening* seguida de nitretação, pois o tratamento mecânico modifica simultaneamente a topografia, o encruamento e o estado de tensões que constituirão a condição inicial da etapa termoquímica. Consequentemente, parâmetros convencionais de amplitude, como R_a e R_z , são úteis para caracterizar a superfície, mas não descrevem isoladamente a distribuição funcional da topografia nem o conjunto das alterações subsuperficiais associadas ao contato.

A caracterização topográfica também exige distinguir parâmetros obtidos de perfis bidimensionais daqueles determinados sobre áreas tridimensionais. Parâmetros com prefixo R, como R_a , R_z , R_{pk} , R_k e R_{vk} , são definidos a partir de perfis; parâmetros com prefixo S, como S_a , S_q , S_{pk} , S_k e S_{vk} , resultam de avaliações areais e não devem ser tratados como valores diretamente intercambiáveis. No domínio bidimensional, a curva de Abbott–Firestone, ou curva de razão de material, permite separar a região de picos, caracterizada por R_{pk} , a região central do perfil, representada por R_k , e os vales mais profundos, representados por R_{vk} ; Mr_1 e Mr_2 delimitam as transições entre essas regiões. Bigerelle e Iost (2007) discutem a determinação desses parâmetros segundo os procedimentos então estabelecidos pela DIN 4776 e ISO 13565, enquanto estudos de *shot peening* empregaram a ISO 13565-2 em conjunto com a ISO 4287 para a avaliação por perfilometria. Para comparações quantitativas, devem ser considerados o método de filtragem, o comprimento de avaliação, o *cutoff* e a separação entre forma, ondulação e rugosidade. Zaleski e Skoczylas (2015) determinaram R_{pk} , R_k e R_{vk} por perfilometria, utilizando equipamento Hommel-Etamic T8000 RC120-400 e as normas ISO 13565-2 e ISO 4287, sem informar *cutoff* ou comprimento de avaliação. Em Dalcin et al. (2022), R_a e R_z foram medidos segundo a ISO 4287 com perfilômetro Mitutoyo SJ-210, ponta de 8 μm , *cutoff* de 0,8 mm e comprimento de medição de 4,0 mm.

A família R_k é particularmente sensível às modificações topográficas produzidas pelo *shot peening*. Estudos realizados em diferentes condições de jateamento mostraram alterações de R_{pk} , R_k e R_{vk} em função da severidade e da condição superficial inicial, indicando que a resposta não é monotônica nem universal (ZALESKI; SKOCZYLAS, 2015; SKOCZYLAS; ZALESKI, 2019). Entretanto, esses parâmetros não foram empregados de forma sistemática nos estudos de *shot peening* seguido de nitretação a plasma considerados nesta revisão. Sua inclusão, portanto, não pretende demonstrar uma correlação já estabelecida para o DIN 18MnCrSiMo6-4, mas indicar uma ferramenta complementar para futuras avaliações da sequência, especialmente para relacionar a distribuição de picos, núcleo e vales com a evolução do contato e do desgaste.

4. EVIDÊNCIAS SOBRE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS COMBINADOS

Como não foram identificados, nas buscas realizadas, estudos indexados que aplicassem diretamente *shot peening* seguido de nitretação a plasma ao DIN 18MnCrSiMo6-4 ou a outro aço bainítico de resfriamento contínuo, a análise da sequência baseia-se em resultados obtidos em outras classes de aços. Esses estudos demonstram que o estado produzido pelo tratamento mecânico pode modificar a resposta à nitretação, porém o sentido e a magnitude dessa interação dependem do substrato e das condições de cada etapa. Entre as variáveis envolvidas estão a deformação plástica, o refinamento microestrutural, a densidade de defeitos, as tensões residuais, a topografia e a condição físico-química da superfície antes da nitretação.

Uma das interações mais relevantes ocorre no estado de tensões residuais. As tensões

compressivas introduzidas pelo *shot peening* não devem ser consideradas invariáveis durante a etapa termoquímica, pois a exposição térmica pode promover relaxamento ou redistribuição, enquanto a incorporação de nitrogênio e a precipitação de nitretos geram novas contribuições ao campo de tensões. Em AISI 4140, Kovacı et al. (2019) determinaram por difração de raios X uma tensão residual superficial de -190 ± 15 MPa na condição inicial e de -410 ± 40 MPa após *shot peening* com intensidade de 24A. A nitretação isolada a 500 °C por 4 h resultou em -430 ± 45 MPa, enquanto a mesma nitretação precedida pelo tratamento de 24A produziu -480 ± 45 MPa. Os valores referem-se à região superficial analisada por difração de raios X; a profundidade física de penetração da medição não foi informada pelos autores. Esses resultados mostram que o estado final permanece fortemente compressivo, mas não corresponde à simples soma das tensões produzidas pelos dois tratamentos isoladamente.

A relação entre tensões residuais e transporte de nitrogênio também não deve ser generalizada a partir de um único mecanismo. Hirsch et al. (2004), em aço ferramenta M2, produziram estados superficiais distintos por polimento e por jateamento seguido de leve polimento. As superfícies apresentaram rugosidades semelhantes, mas tensões compressivas próximas de -127 e -1580 MPa, respectivamente. Após nitretação a plasma a 500 °C, a condição de maior compressão apresentou menor profundidade determinada pelo perfil de dureza; após 60 min, foram obtidos 61 μm para a superfície polida e 30 μm para a condição previamente jateada. O estudo fornece evidência de que o estado de tensões pode interferir na incorporação e no transporte de nitrogênio em M2; entretanto, o próprio processamento mecânico também altera defeitos cristalinos, precipitação e outras características subsuperficiais. Portanto, esse resultado não permite estabelecer uma relação universal segundo a qual maior compressão sempre produza menor difusão. De modo semelhante, o aumento da densidade de discordâncias não deve ser interpretado apenas como criação de caminhos preferenciais, pois defeitos e interfaces também podem modificar a distribuição e a mobilidade local do nitrogênio. O efeito resultante depende da microestrutura, da temperatura e das demais condições de nitretação. Hirsch et al. também observaram estabilidade das tensões previamente introduzidas no aço M2 nas condições avaliadas, demonstrando que a estabilidade térmica do estado de tensões é dependente do material.

Essa dependência é evidente quando se comparam os resultados de Kovacı et al. (2019) e Manfredini et al. (2014). No AISI 4140, a nitretação a 500 °C por 4 h produziu zona de difusão de aproximadamente 225 μm , enquanto o pré-tratamento com intensidade de 24A elevou esse valor para aproximadamente 350 μm . Os autores relacionaram esse comportamento ao aumento de defeitos e discordâncias produzido pelo *shot peening*, interpretados como caminhos adicionais para o transporte de nitrogênio; a maior profundidade de zona de difusão é um resultado experimental, enquanto a atuação dos defeitos como mecanismo responsável constitui a interpretação proposta pelos autores. Em contraste, Manfredini et al. (2014) observaram em aço IF estabilizado ao Ti redução da espessura da camada de compostos após o pré-tratamento. A 500 °C, essa espessura passou de $5,7 \pm 1,4$ para $4,8 \pm 1,3$ μm ; a 450 °C, de $4,0 \pm 0,6$ para $2,8 \pm 0,9$ μm . O aumento de rugosidade provocado pelo *shot peening* e a menor incorporação de nitrogênio foram apontados pelos autores como explicação para esse comportamento. Esses resultados indicam que deformação e refinamento microestrutural não atuam isoladamente; topografia, estado de tensões, condição química da superfície, presença de óxidos ou contaminantes e procedimentos de limpeza ou *sputtering* também podem modificar a interação plasma-superfície e dificultam atribuir a resposta da nitretação a uma única variável.

As diferenças também se refletem no comportamento tribológico. Os ensaios de Kovacı et al. (2019) foram realizados em deslizamento recíproco a seco, com carga de 5 N, distância total de 141 m, curso de 8 mm e esfera de Al_2O_3 de 6 mm. Nessas condições, a nitretação

isolada por 4 h apresentou coeficiente de atrito de 0,42 e valor de taxa de desgaste de 3,6 na escala de $10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ utilizada pelos autores. Com *shot peening* de 24A seguido pela mesma nitretação, o coeficiente de atrito aumentou para 0,46, enquanto o valor tabulado da taxa de desgaste foi reduzido para 0,011 na mesma escala. Em Manfredini et al. (2014), por outro lado, os ensaios foram realizados em configuração esfera sobre placa, também a seco, com esfera de WC-Co de 6 mm, carga de 10 N, velocidade de 0,2 m/s e distância de 2500 m. As condições previamente jateadas e posteriormente nitretadas apresentaram volumes de desgaste superiores aos das condições apenas nitretadas, em um regime no qual foi identificada participação de desgaste oxidativo. Portanto, esses resultados devem ser comparados apenas qualitativamente entre os estudos, pois diferenças de carga, geometria, distância, contracorpo e mecanismo de desgaste impedem uma ordenação quantitativa direta do desempenho.

Estudos em aços inoxidáveis austeníticos também mostram que a pré-deformação pode aumentar a profundidade da região modificada durante a nitretação, como observado por Shen et al. (2010) e Biehler, Hoche e Oechsner (2017). Entretanto, nesses materiais participam mecanismos específicos da matriz austenítica, incluindo transformação martensítica induzida por deformação e formação de austenita expandida; esses resultados não constituem evidência direta para o DIN 18MnCrSiMo6-4. Assim, a literatura disponível demonstra que a aplicação sequencial pode produzir respostas favoráveis ou desfavoráveis, dependendo da interação entre o estado produzido pelo tratamento mecânico e a etapa termoquímica. Para os aços bainíticos de resfriamento contínuo, permanece necessário verificar experimentalmente quais desses mecanismos são efetivamente relevantes.

A Tabela 2 sintetiza os dez estudos selecionados para a comparação. Os trabalhos foram organizados segundo sua relação com o objeto desta revisão, distinguindo-se evidências diretas obtidas no DIN 18MnCrSiMo6-4, estudos de *shot peening* em materiais contendo bainita produzida por outras rotas e estudos da aplicação sequencial de *shot peening* (SP) e nitretação a plasma (NP) em outras classes de aços. Para manter a comparação sistemática, a resposta superficial é apresentada segundo espessura da camada, dureza, tensão residual e rugosidade. Quando determinada propriedade não foi reportada pelo estudo consultado, indica-se “não informado”; quando não se aplica ao tratamento avaliado, indica-se “não aplicável”.

Material / referência / evidência	Shot Peening	Nitretação	Resposta Superficial	Ensaio Funcional	Resultado Principal
DIN 18MnCrSiMo6-4 ; Dalcin et al. (2020a). Direta, NP, Laminado a quente e resfriado ao ar	Não aplicado	400, 450, 500 e 550 °C; 3, 6 e 9 h; 76 vol.% N ₂ + 24 vol.% H ₂ ; 300 Pa; potência eficaz: 0,9–1,6 kVA	A 500 °C/6 h: camada de compostos $6,7 \pm 0,3 \mu\text{m}$; profundidade $192,4 \pm 24,9 \mu\text{m}$; dureza $1294,8 \pm 107,8 \text{ HV0,1}$; tensão residual $-1047,0 \pm 16,5 \text{ MPa}$; rugosidade não informada.	Não realizado	Temperatura e tempo aumentaram a profundidade; 550 °C produziu maior profundidade, com redução da dureza do núcleo.
DIN 18MnCrSiMo6-4 ; Dalcin et al. (2020b). Direta, NP, Laminado a quente e resfriado ao ar	Não aplicado	500 °C; 3, 6 e 9 h; 5, 24 e 76 vol.% N ₂ em H ₂ ; 400 Pa para 5% N ₂ ; 300 Pa para 24 e 76% N ₂ ; potência eficaz: 0,9–1,3 kVA	A 9 h, para 5, 24 e 76 vol.% N ₂ : camada de compostos 0,7; 3,9; 8,2 μm ; profundidade 172,7; 223,3; 245,4 μm ; dureza 853,9; 1078,1; 1079,2 HV0,1 ; tensão	Não realizado	Maior teor de N ₂ aumentou a camada e modificou sua constituição; 5% N ₂ favoreceu γ' -Fe ₄ N; 24 e 76% N ₂ produziram γ' -Fe ₄ N + ϵ -Fe ₂ -

Material / referência / evidência	Shot Peening	Nitretação	Resposta Superficial	Ensaio Funcional	Resultado Principal
			residual -692,2; -694,5; -885,2 MPa; rugosidade não informada.		₃ (C)N.
DIN 18MnCrSiMo6-4 ; Dalcin et al. (2021). Direta, NP, Laminado a quente e resfriado ao ar	Não aplicado	400, 450, 500 e 550 °C; 3, 6 e 9 h; 76 vol.% N ₂ + 24 vol.% H ₂ ; 300 Pa; densidade de corrente: 2,0–2,9 mA/cm ²	Profundidade de 66,8 a 335,6 µm; camada de compostos de 0,6 a 11,5 µm; dureza superficial de aproximadamente 1029 a 1295 HV0,1; tensão residual não determinada neste estudo; Ra e Rz aumentaram após a nitretação, com maiores valores nas condições de maior temperatura e tempo.	Reciprocante seco, ASTM G133; ZrO ₂ , Ø 4,76 mm; 6 N; 4 Hz; curso 4 mm	550 °C/6 h e 9 h atingiram 58 m sem aumento abrupto do COF; a exposição a 550 °C reduziu a dureza do núcleo.
DIN 18MnCrSiMo6-4 ; Dalcin et al. (2022). Direta, NP, Laminado a quente e resfriado ao ar	Não aplicado	500 °C; 3, 6 e 9 h; 5, 24 e 76 vol.% N ₂ em H ₂ ; 400 Pa para 5% N ₂ ; 300 Pa para 24 e 76% N ₂ ; densidade de corrente: 1,8; 2,1; 2,4 mA/cm ² para 5; 24; 76 vol.% N ₂	A 500 °C: dureza máxima de 1295 HV0,1 para 76 vol.% N ₂ /6 h; maiores tensões residuais compressivas com 76 vol.% N ₂ ; Ra e Rz aumentaram com a nitretação. Para 76 vol.% N ₂ /6 h, Ra ≈ 0,31 µm e Rz ≈ 1,9 µm.	Reciprocante seco, ASTM G133; ZrO ₂ , Ø 4,76 mm; 6 N; 4 Hz; curso 4 mm; primeiro dano	A 9 h: distância até o primeiro dano de aproximadamente 45 m para 5 e 24 vol.% N ₂ e 30 m para 76 vol.% N ₂ ; tempo e interação gás × tempo foram significativos.
Aço bainítico de médio C e alto Si, austemperado ; Tiwari, Oraon e Varshney (2026). Indireta, bainita	Esferas, Ø 1 mm; 45 m/s; 90°; Almen 0,30 mmA; cobertura 100, 200 e 300%; 1, 2 e 3 min	Não aplicado	Camada nitretada não aplicável; dureza de 352,4 ± 9,1 HV sem <i>shot peening</i> e 690 ± 12,4 HV após 3 min; tensão residual e rugosidade não informadas.	Não realizado	Maior severidade reduziu austenita retida e aumentou defeitos, refinamento e dureza; nanogrãos foram identificados apenas após 3 min.
AISI 5160, austemperado ; Han et al. (2020). Indireta, bainita	Ferro fundido branco, Ø 1,25 mm; 2 min; 90°; cobertura 100%; velocidade não informada	Não aplicada	Camada nitretada não aplicável; dureza entre 31,7 e 50,9 HRC antes do <i>shot peening</i> e entre 32,4 e 51,7 HRC após o tratamento; tensão residual aproximadamente 500 a 600 MPa mais compressiva após <i>shot peening</i> e polimento; Ra entre aproximadamente 0,25 e 0,37 µm após preparação para o ensaio.	Reciprocante, PAO4; AISI 52100, Ø 8,7 mm; 320 N; 2 Hz; curso 6 mm; 10 min	Austêmpera a 316 °C: volume de desgaste de 0,0119 mm ³ sem SP e 0,0032 mm ³ após SP, redução de aproximadamente 73%; resposta dependente da condição bainítica.
AISI 4140, ferrítico-perlítico ; Kovacı et al.	Aço S230; 16A, 20A e 24A; cobertura 200%	500 °C; 1 e 4 h; 50 vol.% N ₂ + 50 vol.% H ₂ ; 500 Pa	Nitretação por 4 h: zona de difusão 225 µm; dureza 660–680 HV0,1; tensão	Reciprocante seco; Al ₂ O ₃ , Ø 6 mm; 5 N; 141 m; curso 8 mm	NP 4 h: 3,6 × 10 ⁻⁵ mm ³ /(N·m); COF 0,42. SP 24A + NP 4 h: 0,011 ×

Material / referência / evidência	Shot Peening	Nitretação	Resposta Superficial	Ensaio Funcional	Resultado Principal
(2019). Indireta, sequência			residual -430 ± 45 MPa. 24A + nitretação por 4 h: 350 μm ; 650–670 HV0,1; -480 ± 45 MPa. Rugosidade determinada pelos autores e apresentada graficamente.		$10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$; COF 0,46.
Aço IF estabilizado ao Ti ; Manfridini et al. (2014). Indireta, sequência	Esferas de aço inoxidável, $\varnothing$ 0,09–0,20 mm; 100 psi; cobertura 100%	450, 475 e 500 °C; 4 h; 40 vol.% N_2 + 60 vol.% Ar; 0,4 Pa	A 500 °C: camada de compostos $5,7 \pm 1,4 \mu\text{m}$ sem <i>shot peening</i> e $4,8 \pm 1,3 \mu\text{m}$ com pré-tratamento; dureza próxima à superfície aproximadamente duplicada após nitretação; tensão residual não informada; Ra e Rq aumentaram aproximadamente duas vezes após <i>shot peening</i> e atingiram os maiores valores após a sequência.	Esfera sobre plano, seco; WC-Co, $\varnothing$ 6 mm; 10 N; 0,2 m/s; 2500 m	Após 2500 m: NP isolada apresentou aproximadamente 0,06–0,07 mm^3 de desgaste; SP + NP, aproximadamente 0,11–0,12 mm^3 . Valores estimados da Figura 12.
AISI 304, austenítico ; Shen et al. (2010). Indireta, sequência	Aço, $\varnothing$ 0,8 mm; 0,8 MPa; 5 min; cobertura não informada	410, 450, 480, 500 e 520 °C; 4 h; NH_3 ; 410–420 Pa; 600–650 V	A 410 °C: camada de aproximadamente 2,5 μm sem <i>shot peening</i> e 5 μm após pré-tratamento; dureza superficial após <i>shot peening</i> aproximadamente duas vezes a do substrato, de 220 HV; tensão residual e rugosidade não determinadas.	Polarização anódica; NaCl 3,5%	SP aumentou a espessura da região nitretada, mas a resposta envolveu transformação martensítica e fase S, específicas da matriz austenítica.
AISI 304L/316L, solubilizados ; Biehler, Hoche e Oechsner (2017). Indireta, sequência	Microjateamento com esferas de vidro, $\varnothing$ 100–200 μm ; 30 s; 3–4 bar; cobertura não informada	370 °C/960 min ou 420 °C/360 min; 80 vol.% N_2 + 20 vol.% H_2 ; 300 Pa; 500 V	A 420 °C: profundidade no 304L de $4,2 \pm 0,5 \mu\text{m}$ polido e $5,8 \pm 1,1 \mu\text{m}$ microjateado; no 316L, $4,7 \pm 0,5$ e $5,7 \pm 0,6 \mu\text{m}$. Dureza: 304L, 1357 ± 84 e 1578 ± 179 HV0,005; 316L, 1312 ± 90 e 1615 ± 247 HV0,005. Tensão residual e rugosidade não informadas.	Corrosão em NaCl 5%; desgaste não realizado	Pré-deformação aumentou a profundidade nitretada; efeitos associados a defeitos e, no 304L, à formação de α' , portanto não diretamente transferíveis ao DIN.

Tabela 2: Síntese dos estudos selecionados sobre *shot peening*, nitretação a plasma e tratamentos sequenciais.
Fonte: Elaborado pelo autor.

5. LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS

A interpretação dos resultados desta revisão é limitada pela heterogeneidade dos materiais,

das condições de *shot peening* e nitretação, dos métodos de caracterização e dos ensaios funcionais empregados nos estudos selecionados. Os trabalhos que avaliam diretamente o DIN 18MnCrSiMo6-4 concentram-se na nitretação a plasma, enquanto os efeitos do *shot peening* em materiais bainíticos foram investigados principalmente em aços obtidos por outras rotas e os estudos da sequência completa empregaram outras classes de aços. Além disso, diferenças de carga, contracorpo, distância, velocidade, lubrificação e critério de falha impedem a comparação quantitativa direta dos resultados tribológicos. Consequentemente, os mecanismos discutidos para a sequência devem ser considerados como base para formulação de hipóteses experimentais, e não como demonstração do comportamento do DIN 18MnCrSiMo6-4.

Para estudos futuros nesse aço, a nitretação pode ser inicialmente investigada dentro da própria janela já caracterizada para o material, priorizando temperaturas entre 450 e 500 °C e tempos entre 3 e 6 h, condições nas quais é possível avaliar o desenvolvimento da camada sem recorrer imediatamente às condições de maior exposição térmica estudadas por Dalcin et al. (2020a, 2021). Para o *shot peening*, os estudos disponíveis não fornecem base suficiente para transferir ao DIN uma intensidade Almen específica. Assim, a etapa mecânica deve ser inicialmente investigada em condições convencionais controladas, com intensidade Almen, cobertura, meio de impacto e tempo explicitamente definidos, avaliando mais de uma severidade antes da seleção de uma condição para a sequência. A comparação deve incluir o estado sem tratamento, *shot peening* isolado, nitretação isolada e tratamento sequencial, permitindo separar os efeitos de cada etapa.

A avaliação dessas condições deve combinar perfil de dureza, constituição e profundidade da camada, tensões residuais em profundidade e caracterização topográfica antes e após cada etapa, seguida de ensaios tribológicos realizados sob um mesmo regime de contato.

6. CONCLUSÕES

A evidência experimental disponível diretamente para o DIN 18MnCrSiMo6-4 demonstra que a nitretação a plasma modifica de forma significativa a dureza superficial, a profundidade e a constituição da camada nitretada, o estado de tensões residuais e a resposta tribológica. Temperatura, tempo e composição da atmosfera exercem efeitos interdependentes sobre essas características. Entretanto, nas buscas realizadas não foram identificados estudos indexados que aplicassem diretamente a sequência de *shot peening* e nitretação a plasma ao DIN 18MnCrSiMo6-4 ou a outro aço bainítico de resfriamento contínuo. Dessa forma, o desempenho dessa sequência nesses materiais ainda não pode ser considerado experimentalmente demonstrado.

Os mecanismos discutidos para o pré-tratamento por *shot peening* são sustentados principalmente por estudos realizados em outros materiais. A deformação superficial pode modificar a densidade de defeitos, a microestrutura, a dureza, as tensões residuais e a topografia que constituem a condição inicial da nitretação. Contudo, essas alterações não produzem uma resposta única. Em AISI 4140, o pré-tratamento seguido de nitretação aumentou a profundidade da zona de difusão e reduziu a taxa de desgaste em relação à nitretação isolada. Em aço IF estabilizado ao Ti, a mesma sequência reduziu a espessura da camada de compostos e resultou em maior desgaste que a nitretação isolada. Resultados obtidos em aços inoxidáveis austeníticos também indicam influência favorável da pré-deformação sobre a profundidade nitretada, porém envolvem mecanismos associados à martensita induzida por deformação e à formação de austenita expandida, que não são diretamente transferíveis aos aços bainíticos de resfriamento contínuo.

A comparação entre esses estudos indica que o comportamento da sequência deve ser interpretado a partir da integridade superficial produzida pelo conjunto dos tratamentos.

Profundidade e constituição da camada, dureza, tensões residuais, suporte mecânico do substrato e topografia atuam simultaneamente durante o contato tribológico. Parâmetros derivados da curva de razão de material podem complementar a caracterização de superfícies modificadas por *shot peening*, mas sua correlação com a resposta da sequência ainda não foi demonstrada diretamente para o DIN 18MnCrSiMo6-4.

Assim, a principal lacuna permanece na avaliação experimental da sequência completa em aços bainíticos de resfriamento contínuo. Estudos futuros devem comparar condições sem tratamento, *shot peening* isolado, nitretação isolada e tratamento sequencial, caracterizando o estado superficial após cada etapa e utilizando condições tribológicas equivalentes. Essa abordagem permitirá determinar se as modificações introduzidas pelo pré-tratamento efetivamente favorecem a formação da camada e o desempenho funcional nesses materiais, sem assumir que os resultados observados em outras classes de aços sejam diretamente transferíveis.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio da chamada Universal, processo nº 407185/2023-2. Frederico Murilo Wlassak agradece à CAPES (processo nº 88887.007108/2024-00).

REFERÊNCIAS

- AGHAJANI, H.; BEHRANGI, S. *Plasma Nitriding of Steels*. Cham: Springer International Publishing, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43068-3>.
- BAGHERIFARD, S. et al. Nanoscale surface modification of AISI 316L stainless steel by severe shot peening. *Materials & Design*, v. 102, p. 68–77, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.162>.
- BAGHERIFARD, S.; GHELICHI, R.; GUAGLIANO, M. On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation: a critical review and some original developments. *Applied Surface Science*, v. 259, p. 186–194, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.07.017>.
- BEVILAQUA, W. L. et al. 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*, v. 51, n. 7, p. 3627–3637, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05800-6>.
- BIEHLER, J.; HOCHE, H.; OECHSNER, M. Corrosion properties of polished and shot-peened austenitic stainless steel 304L and 316L with and without plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, v. 313, p. 40–46, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.050>.
- BIGERELLE, M.; IOST, A. A numerical method to calculate the Abbott parameters: a wear application. *Tribology International*, v. 40, n. 9, p. 1319–1334, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.12.007>.
- BLECK, W.; BAMBACH, M.; WIRTHS, V.; STIEBEN, A. Microalloyed engineering steels with improved performance: an overview. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, v. 72, n. 6, p. 346–354, 2017. <https://doi.org/10.3139/105.110339>.
- BRAMFITT, B. L.; SPEER, J. G. A perspective on the morphology of bainite. *Metallurgical Transactions A*, v. 21, n. 3, p. 817–829, 1990. <https://doi.org/10.1007/BF02656565>.
- CHEN, J. S.; DESAI, D. A.; HEYNS, S. P.; PIETRA, F. Literature review of numerical simulation and optimisation of the shot peening process. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 11, n. 3, p. 1–19, 2019. <https://doi.org/10.1177/1687814018818277>.
- DALCIN, R. L. et al. Surface processing to improve the fatigue strength of bainitic steels: an overview. *International Journal of Engineering & Technology*, v. 8, n. 3, p. 324–332, 2019. <https://doi.org/10.14419/ijet.v8i3.29483>.
- DALCIN, R. L. et al. Response of a DIN 18MnCrSiMo6-4 continuous cooling bainitic steel to plasma nitriding with a nitrogen rich gas composition. *Materials Research*, v. 23, n. 2, e20200036, 2020a. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0036>.

- DALCIN, R. L. et al. Response of a DIN 18MnCrSiMo6-4 continuous cooling bainitic steel to different plasma nitriding gas mixtures. *Materials Research*, v. 23, n. 5, e20200269, 2020b. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0269>.
- DALCIN, R. L. et al. Influence of plasma nitriding with a nitrogen rich gas composition on the reciprocating sliding wear of a DIN 18MnCrSiMo6-4 steel. *Materials Research*, v. 24, n. 4, e20200592, 2021. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0592>.
- DALCIN, R. L. et al. Microstructure and wear properties of a low carbon bainitic steel on plasma nitriding at different N₂-H₂ gas mixtures. *Materials Research*, v. 25, e20210447, 2022. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0447>.
- DE CASTRO, P. J. et al. Two-step continuous cooling heat treatment applied in a low carbon bainitic steel. *Materials Research*, v. 24, n. 2, e20200334, 2021. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0334>.
- HAN, X. et al. Tribological behavior of shot peened/austempered AISI 5160 steel. *Tribology International*, v. 145, 106197, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106197>.
- HIRSCH, T. K. et al. Residual stress-affected diffusion during plasma nitriding of tool steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 35, n. 11, p. 3523–3530, 2004. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0189-2>.
- KOVACI, H. et al. Effects of shot peening pre-treatment and plasma nitriding parameters on the structural, mechanical and tribological properties of AISI 4140 low-alloy steel. *Surface and Coatings Technology*, v. 358, p. 256–265, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.043>.
- LLANEZA, V.; BELZUNCE, F. J. Study of the effects produced by shot peening on the surface of quenched and tempered steels: roughness, residual stresses and work hardening. *Applied Surface Science*, v. 356, p. 475–485, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.110>.
- MANFRIDINI, A. P. A. et al. Surface hardening of IF steel by plasma nitriding: effect of a shot peening pre-treatment. *Surface and Coatings Technology*, v. 260, p. 168–178, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.064>.
- MIAO, H. Y.; LAROSE, S.; PERRON, C.; LÉVESQUE, M. An analytical approach to relate shot peening parameters to Almen intensity. *Surface and Coatings Technology*, v. 205, n. 7, p. 2055–2066, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.105>.
- SCHULZE, V. *Modern Mechanical Surface Treatment: States, Stability, Effects*. Weinheim: Wiley-VCH, 2006. <https://doi.org/10.1002/3527607811>.
- SHEN, L. et al. Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot peening. *Surface and Coatings Technology*, v. 204, n. 20, p. 3222–3227, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.03.018>.
- SKOCZYLAS, A.; ZALESKI, K. Effect of centrifugal shot peening on the surface properties of laser-cut C45 steel parts. *Materials*, v. 12, n. 21, 3635, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12213635>.
- TIWARI, P.; ORAON, M.; VARSHNEY, A. Evolution of surface microstructure in austempered medium carbon high silicon steels due to shot peening. *Surface and Coatings Technology*, v. 531, 133542, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2026.133542>.
- TOBOŁA, D. Influence of sequential surface treatment processes on tribological performance of Vanadis 6 cold work tool steel. *Wear*, v. 488–489, 204106, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204106>.
- TURRA, C. J. *Caracterização mecânica e metalúrgica de um aço bainítico de resfriamento contínuo aplicado no processo industrial de forjamento a quente*. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- ZALESKI, K.; SKOCZYLAS, A. Effect of vibration shot peening parameters upon shapes of bearing curves of alloy steel surface. *Advances in Science and Technology Research Journal*, v. 9, n. 25, p. 20–26, 2015. <https://doi.org/10.12913/22998624/1920>.