ANÁLISE DA TENSÃO RESIDUAL DO PROCESSO DE FRESAMENTO DA LIGA DE AÇO INOX DÚPLEX UNS S31803 ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER - FFT

Gabriel Augusto do Prado Raymundo[1], Edilon de Oliveira França[2], Amir Rivaroli Junior[3], Emerson Augusto Raymundo[4]

FATEC de Pindamonhangaba, Rodovia Vereador Abel
Fabrício Dias, 4010, Água Preta – Pindamonhangaba/SP
122445-010, Brasil, gabriel.raymundo@cps.sp.gov.br, edilon.franca@cps.sp.gov.br,
amir.rivaroli@cps.sp.gov.br, emerson.raymundo@cps.sp.gov.br

Resumo
Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia de processamento digital de imagens para caracterizar a assinatura óptica da superfície fresada do aço inoxidável dúplex UNS S31803. O fresamento foi realizado em uma máquina CNC, utilizando ferramenta de 80 mm com seis pastilhas de metal duro revestidas por PVD, velocidade de corte de 180 m/min e avanço de 0,18 mm/dente. As imagens foram calibradas, convertidas em escala de cinza e processadas no ImageJ por meio da Transformada Rápida de Fourier. O espectro de magnitude apresentou orientação preferencial e permitiu extrair descritores de intensidade, frequência e periodicidade. Obteve-se frequência dominante de 36,48 ciclos/mm, periodicidade de 27,42 µm, intensidade média da banda dominante de 161,475 e índice espectral normalizado de 0,246. Concluiu-se que a metodologia possibilita quantificar padrões ópticos da superfície usinada, constituindo uma base para futuras correlações entre os descritores espectrais, a integridade superficial e o estado de tensão residual.

Palavras-chave: Aço inoxidável dúplex. Fresamento. Transformada Rápida de Fourier. Tensões residuais.

Área do Conhecimento: Engenharias → Engenharia Mecânica → Processos de Fabricação

Introdução

Os aços inoxidáveis dúplex são materiais caracterizados por uma microestrutura composta, em proporções aproximadamente equivalentes, pelas fases ferrita e austenita. Essa combinação microestrutural proporciona elevada resistência mecânica, boa tenacidade e resistência à corrosão localizada e sob tensão, permitindo sua utilização nas indústrias química, petroquímica, naval, de papel e celulose e de geração de energia. Entre esses materiais, destaca-se o aço inoxidável dúplex UNS S31803, comercialmente conhecido como SAF 2205, empregado em componentes sujeitos simultaneamente a solicitações mecânicas e ambientes corrosivos (GUNN, 1997; ALVAREZ-ARMAS; DEGALLAIX-MOREUIL, 2009). A integridade superficial compreende o conjunto de características topográficas, mecânicas, metalúrgicas e físico-químicas desenvolvidas na camada superficial de um componente após o processo de fabricação. Além da rugosidade e das marcas de avanço, devem ser consideradas alterações como deformação plástica, encruamento, transformações microestruturais, microtrincas e tensões residuais. Essas alterações podem afetar diretamente a resistência à fadiga, ao desgaste e à corrosão, bem como a vida útil do componente usinado (M'SAOUBI et al., 2008; JAWAHIR et al., 2011).

As tensões residuais correspondem às tensões que permanecem no material mesmo após a retirada dos esforços externos que atuaram durante a fabricação. No processo de fresamento, sua formação está associada à interação entre os efeitos mecânicos e térmicos gerados pela passagem dos gumes de corte. A deformação plástica e o carregamento mecânico podem favorecer a formação de tensões compressivas, enquanto o aquecimento e o resfriamento não uniformes da camada superficial podem contribuir para o desenvolvimento de tensões trativas. O estado resultante depende, entre outros fatores, da velocidade de corte, do avanço, das profundidades axial e radial, da geometria e do desgaste da ferramenta, das propriedades do material e da condição de refrigeração (M'SAOUBI et al., 2008; JAWAHIR et al., 2011). A avaliação das tensões residuais pode ser realizada por técnicas como

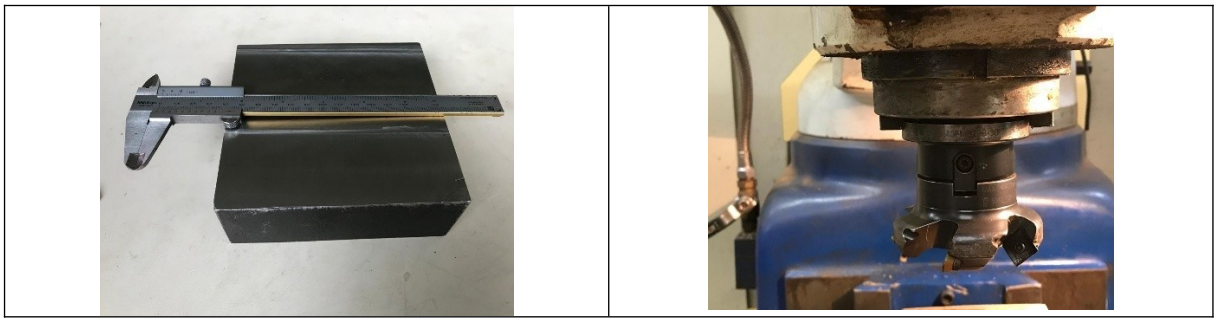
difração de raios X, difração de nêutrons, método do furo central e métodos ultrassônicos. Embora consolidadas, essas técnicas podem exigir equipamentos especializados, preparação da amostra, maior tempo de análise e custos elevados. Esse cenário estimula a investigação de métodos complementares, capazes de identificar alterações superficiais por procedimentos mais rápidos e acessíveis. Entretanto, métodos ópticos indiretos não substituem automaticamente as técnicas convencionais, sendo necessária sua calibração e validação em relação a uma medida independente de tensão residual.

O processamento digital de imagens constitui uma alternativa para quantificar aspectos da superfície que não são adequadamente descritos pelas inspeções visuais. Em imagens convertidas para escala de cinza, cada pixel recebe um valor de intensidade, possibilitando calcular médias, desvios, distribuições, contrastes e parâmetros de textura (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012). A Transformada de Fourier amplia essa possibilidade ao converter as variações de intensidade da imagem do domínio espacial para o domínio da frequência. A Transformada Rápida de Fourier, ou FFT, permite identificar periodicidades, orientações preferenciais e frequências dominantes associadas aos padrões presentes na superfície. No espectro de magnitude, a distância entre um pico e o centro está relacionada à frequência espacial do padrão, enquanto a intensidade da região espectral representa a magnitude relativa daquela componente (GONZALEZ; WOODS, 2018). Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e aplicar uma metodologia de processamento digital de imagens para caracterizar a assinatura óptica de uma superfície fresada do aço inoxidável dúplex UNS S31803. A metodologia foi baseada na calibração espacial da imagem, conversão para escala de cinza, aplicação da Transformada Rápida de Fourier e extração de descritores relacionados à intensidade, frequência e periodicidade do espectro de magnitude.

Metodologia

O material empregado neste estudo foi o aço inoxidável dúplex UNS S31803, comercialmente conhecido como SAF 2205. As superfícies das amostras foram submetidas ao processo de fresamento e, posteriormente, analisadas por meio de imagens digitais, com o objetivo de identificar alterações nos padrões ópticos e espectrais produzidos pela passagem da ferramenta de corte. Por meio das imagens da Figura 01, pode ser visualizado a peça a ferramenta de corte utilizados.

Figura 1 – Peça e a ferramenta de fresamento respectivamente.



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

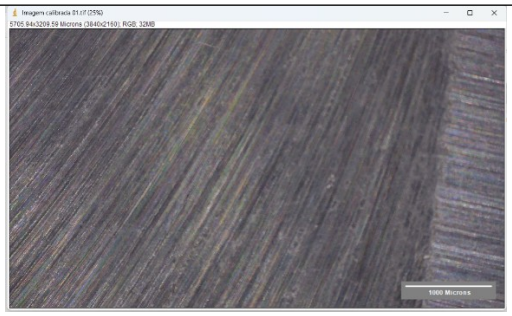
Os ensaios de usinagem foram realizados em uma fresadora CNC Fagor, modelo TR-2. Utilizou-se uma ferramenta de fresamento com diâmetro de 80 mm, equipada com seis pastilhas intercambiáveis de metal duro fabricadas pela Sandvik Coromant. A velocidade de corte foi mantida em 180 m/min e o avanço por dente em aproximadamente 0,18 mm/dente. O processo foi realizado com aplicação abundante de fluido de corte. A rotação correspondente foi determinada para uso 716 rpm. A velocidade de avanço da mesa foi determinada também ficou em torno de 773 mm/min. Após usinagem, foram obtidas imagens digitais da superfície usinada. Para permitir a comparação entre as condições analisadas, procurou-se manter constantes a ampliação, a distância entre a câmera e a amostra, a posição da superfície, a iluminação, o foco, o tempo de exposição e o ganho do sistema de aquisição. A barra de escala foi adicionada somente a uma cópia da imagem, mantendo-se a imagem original destinada ao processamento. Para cada imagem foi selecionada uma região de interesse ROI com dimensões constantes. Essa padronização teve como finalidade assegurar que os descritores ópticos

fossem extraídos de áreas equivalentes da superfície após cada passada. O processamento foi realizado no programa “ImageJ”. Inicialmente, as imagens foram calibradas por meio de uma lâmina micrométrica, estabelecendo-se a relação entre pixels e micrômetros. O fator de calibração espacial foi calculado, pela Equação: $\Delta_x = L / N$. Em que Δ_x corresponde à dimensão física de um pixel, em µm/pixel (*L*) é a extensão real do campo analisado, em valores micrométricos e (*N*) é o número de pixels na direção considerada. Após a calibração, as regiões de interesse foram convertidas para imagens em escala de cinza de 8 bits. A análise da periodicidade e da direcionalidade das marcas de usinagem foi realizada por meio da Transformada Rápida de Fourier — FFT. Para uma imagem digital $I(x, y)$, a transformada bidimensional representado pela expressão: $F(u,v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I(x,y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$. Em que ($I(x, y)$) representa a intensidade da imagem no domínio espacial, ($F(u, v)$) corresponde à sua representação no domínio da frequência, (*M*) e (*N*) são as dimensões da imagem, (u) e (v) representam as coordenadas de frequência. A magnitude espectral foi definida expressão: $M(u,v) = |F(u,v)| = \sqrt{\Re[F(u,v)^2 + \Im[F(u,v)^2}$. No espectro centralizado, a origem das frequências foi posicionada no centro da imagem, correspondente a (u, v) = (0,0). As faixas claras observadas no espectro foram interpretadas como regiões de maior magnitude espectral. Sua orientação foi associada à direcionalidade da textura da superfície, enquanto sua distância em relação ao centro foi relacionada à frequência espacial das estruturas repetitivas produzidas pelo fresamento. Com a ferramenta de linha reta, foi traçada uma linha sobre a faixa de maior intensidade do espectro, atravessando seu centro. Em seguida, utilizou-se o comando “Analyze → Plot Profile”, obtendo-se o perfil dos valores de cinza ao longo da direção selecionada. O ponto central do perfil foi redefinido como frequência zero, e as posições localizadas em lados opostos foram interpretadas como componentes conjugadas de frequência (+*f*) e (-*f*). A frequência correspondente a cada posição do espectro foi determinada por $\Delta_f = \frac{1}{L}$ e em seguida pela expressão $f_k = k\,\Delta_f = \frac{k}{L}$. Em que ($\Delta_f$) é a resolução espectral, (L) é a dimensão física da ROI, expressa em milímetros, (k) é a distância entre o pico e o centro do espectro, expressa em bins; e (f_k) é a frequência espacial, em ciclos/mm. A periodicidade espacial equivalente foi calculada por: $\lambda_k = \frac{1}{f_k}$ em que (λ_k) corresponde à distância média entre estruturas repetitivas da superfície. Quando expressa em micrômetros: $\lambda_k = \frac{1000}{f_k}$. Foram extraídos os seguintes descritores: intensidade máxima do perfil, G_{max}; intensidade média da banda dominante $\overline{G}_{pico}$ desvio-padrão da banda dominante; intensidade média do fundo espectral, $\overline{G}_{fundo}$; contraste espectral; índice espectral normalizado; frequência espacial dominante, f_d; periodicidade equivalente, λ_d. O contraste espectral foi calculado por: $\overline{G}\,pico - \overline{G}\,fundo$. O índice espectral normalizado foi determinado pela expressão $I_N = \frac{\overline{G}\,pico - \overline{G}\,fundo}{\overline{G}\,pico + \overline{G}\,fundo}$. A normalização foi empregada para reduzir a influência de variações globais de intensidade entre as imagens. A proposta metodológica consistiu em investigar se as alterações ópticas e espectrais da superfície usinada acompanham as mudanças causadas pela interação entre ferramenta e material. Assim, os descritores não foram considerados medidas diretas de tensão residual, mas variáveis ópticas destinadas à análise de correlação. A relação geral investigada pode ser representada pela expressão: $\sigma_R = f(G_{max}, \overline{G}\,pico,\ C_G,\ I_N,\ f_d,\ \lambda_d)$. Em que ($\sigma_R$) representa o estado de tensão residual e os demais termos correspondem aos descritores obtidos no processamento das imagens. Desse modo, buscou-se estabelecer uma assinatura óptica associada às alterações da superfície em cada passada da ferramenta, constituindo uma etapa inicial para o desenvolvimento de um método indireto de monitoramento.

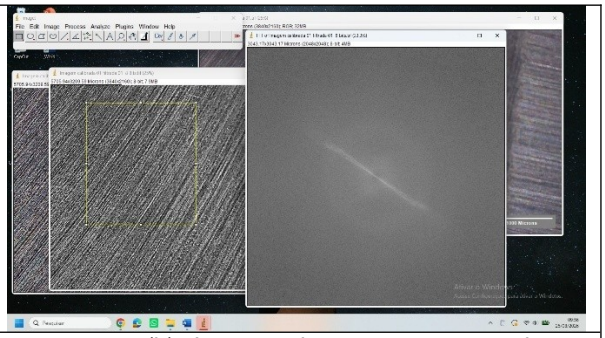
Resultados

A aplicação da metodologia de processamento digital permitiu obter, a imagem em escala de cinza da superfície fresada, o espectro de magnitude gerado pela FFT e o perfil de intensidade espectral. A Figura 2 apresenta a imagem da superfície do material após o fresamento e a delimitação da região empregada no processamento e todo processo para geração do espectro de magnitude obtido por meio da FFT. A frequência zero foi posicionada no centro do espectro. Também foi observada uma faixa de maior intensidade atravessando sua região central. A região selecionada foi calibrada, convertida para escala de cinza de 8 bits e utilizada para geração do espectro de magnitude.

Figura 1 – Todo processo feito no “Image J” sa superfície fresada do aço inoxidável dúplex UNS S31803



(a) Imagem calibrada antes do processamento



(b) Imagens do processamento e do espectro de magnitude da FFT

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

O perfil espectral foi exportado pelo “ImageJ” no formato CSV, resultando em 1.304 observações. O centro geométrico do perfil foi localizado entre os pontos 651 e 652 e redefinido como a origem da frequência: $f = 0$. Os descritores extraídos da imagem são sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Descritores obtidos do espectro de magnitude da superfície fresada

Descritor	Símbolo	Resultado
Número de pontos do perfil	N	1.304
Fator de calibração	Δx	1,486 µm/pixel
Resolução espectral	Δf	0,6572 ciclos/mm
Intensidade máxima	G_{max}	174,654
Intensidade média geral	$\overline{G}\,geral$	121,948
Distância espectral média	$\overline{k}$	55,5 bins
Frequência dominante	f_d	36,48 ciclos/mm
Periodicidade equivalente	λ_d	27,42 µm
Média da banda dominante	$\overline{G}\,pico$	161,475
Desvio-padrão da banda	S_{pico}	7,775
Média do fundo espectral	$\overline{G}\,fundo$	97,802
Contraste espectral	C_G	63,673
Índice espectral normalizado	I_N	0,246

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Discussão

A aplicação da Transformada Rápida de Fourier à imagem da superfície fresada possibilitou converter as variações espaciais dos níveis de cinza em componentes de frequência. Essa transformação permitiu analisar quantitativamente a repetição e a orientação dos padrões ópticos presentes na superfície, aspectos que não são facilmente identificados apenas pela observação direta da imagem original. O espectro de magnitude apresentou uma faixa diagonal atravessando sua região central. Essa característica evidencia a existência de uma orientação preferencial na textura óptica da

superfície. Em superfícies fresadas, essa direcionalidade pode estar associada às marcas produzidas pelo movimento relativo entre ferramenta e peça, à trajetória dos gumes, ao avanço da ferramenta e às deformações localizadas geradas durante a remoção do material. A FFT mostrou-se, portanto, capaz de transformar a orientação visual das marcas de usinagem em uma assinatura espectral passível de mensuração. A faixa espectral foi observada em posições aproximadamente simétricas em relação ao centro. Essa simetria é esperada na transformada de Fourier de imagens reais, pois as componentes de frequência positiva e negativa aparecem como pares conjugados. Consequentemente, os dois lados do espectro não devem ser considerados fenômenos independentes, mas representações complementares da mesma periodicidade existente na imagem. A utilização da distância média dos dois picos em relação ao centro reduziu a influência de pequenas assimetrias causadas por ruídos, variações de iluminação e posicionamento da linha empregada na extração do perfil. A frequência espacial dominante calculada foi de 36,48 ciclos/mm, correspondente a uma periodicidade equivalente de 27,42 µm. Isso significa que a componente predominante identificada pela FFT se repete, em média, a cada 27,42 µm na direção analisada. Esse valor não corresponde diretamente ao avanço por dente de 0,18 mm/dente, equivalente a 180 µm/dente. A periodicidade espectral encontrada é aproximadamente 6,6 vezes menor que o avanço por dente, ou seja, 180/27,42 equivale aproximadamente a 6,56. Essa diferença demonstra que a frequência dominante não deve ser interpretada automaticamente como a distância entre marcas sucessivas deixadas por cada dente da ferramenta. O espectro pode estar registrando componentes menores da textura superficial, como irregularidades internas às marcas de avanço, deformações plásticas localizadas, reflexões produzidas pela topografia, microdefeitos, interação entre os gumes e a superfície ou harmônicos gerados pelo padrão periódico do fresamento. A intensidade máxima do perfil foi de 174,654 níveis de cinza. Entretanto, a utilização isolada desse valor poderia tornar a análise sensível a um único pixel, a ruídos de aquisição ou a uma reflexão localizada. Por esse motivo, a intensidade média da banda dominante, igual a 161,475, representa um descritor mais estável do que o valor máximo. O desvio-padrão de 7,775 demonstra a dispersão dos níveis de cinza dentro da banda selecionada e deverá ser empregado nas comparações com as demais passadas.

O fundo espectral apresentou intensidade média de 97,802, enquanto o contraste entre a banda dominante e o fundo foi de 63,673. Esse resultado confirma numericamente que a região selecionada possui intensidade superior às áreas afastadas da frequência predominante. O contraste espectral pode ser entendido como uma medida da separação entre o padrão direcional da superfície e o conteúdo espectral de fundo. Quanto maior esse contraste, mais destacada se apresenta a componente periódica em relação às demais frequências da imagem. O índice espectral normalizado foi de 0,246. Por ser calculado a partir da diferença e da soma entre as intensidades da banda dominante e do fundo, esse índice apresenta menor dependência da intensidade absoluta do espectro. Isso é relevante porque pequenas variações de iluminação, exposição da câmera ou refletividade da superfície podem alterar globalmente os níveis de cinza. Dessa forma, o índice normalizado tende a ser mais adequado para comparar as diferentes passadas do que o valor máximo isolado. Apesar dessa vantagem, a normalização não elimina completamente os efeitos do sistema óptico. A intensidade registrada depende da iluminação, da ampliação, do foco, da exposição, do ganho da câmera, da inclinação da amostra e da própria refletividade do aço inoxidável dúplex. Assim, a comparação dos descritores entre as passadas somente será válida se todas as imagens tiverem sido obtidas e processadas sob condições equivalentes. Outro aspecto importante refere-se ao formato do espectro produzido pelo “ImageJ”. Os valores analisados encontram-se em uma imagem de 8 bits, com intensidades entre 0 e 255. Esses valores representam a visualização do espectro de magnitude e não devem ser tratados automaticamente como os coeficientes brutos da transformada. Portanto, o valor de 161,475 caracteriza a intensidade média da banda na representação processada, mas não corresponde diretamente à energia física refletida pela peça. A superfície gerada pelo fresamento resulta da combinação de efeitos mecânicos e térmicos. Esses fenômenos integram o conceito de integridade superficial e podem contribuir para a formação de tensões residuais trativas ou compressivas na camada superficial do material (M’SAOUBI et al., 2008; JAWAHIR et al., 2011).

Nesse contexto, é cientificamente plausível investigar se modificações causadas pela usinagem também produzem alterações mensuráveis na assinatura óptica e espectral. Entretanto, a FFT não mede diretamente a deformação elástica da rede cristalina nem fornece a tensão residual em MPa. Ela caracteriza os padrões ópticos e topográficos presentes na imagem da superfície. Assim, os valores de frequência, periodicidade e intensidade espectral devem ser considerados variáveis indiretas ou

descritores candidatos à correlação com o estado de tensão residual. Com os resultados disponíveis para uma única superfície, ainda não é possível estabelecer uma relação matemática entre os descritores ópticos e a tensão residual. Para isso, será necessário aplicar o mesmo processamento às imagens correspondentes às demais passadas e verificar a evolução de todos os parâmetros analisados, ou seja $(\overline{G}_{PICO},\ C_G,\ I_N,\ f_d, \lambda_d)$. Também será necessária uma medida independente de tensão residual, empregada como referência para a calibração e validação do modelo. A relação poderá ser inicialmente examinada por coeficientes de correlação, considerando os descritores espectrais como variáveis independentes e a tensão residual medida como variável dependente: $\sigma_R = f(\overline{G}_{PICO},\ C_G,\ I_N,\ f_d, \lambda_d)$. Caso os descritores apresentem comportamento monotônico entre as passadas e associação estatisticamente significativa com as tensões medidas, será possível desenvolver um modelo de regressão para estimar tendências do estado de tensão. Entretanto, essa associação deverá ser confirmada por repetições experimentais e por um método convencional de referência. Os resultados iniciais demonstraram que a metodologia desenvolvida permite transformar uma imagem da superfície usinada em parâmetros quantitativos. A frequência dominante de 36,48 ciclos/mm descreveu a repetição predominante da textura; a periodicidade de 27,42 µm expressou sua dimensão espacial equivalente; e o contraste espectral e o índice normalizado quantificaram a intensidade relativa dessa componente. Esses descritores constituem a assinatura óptica inicial da superfície analisada e fornecem uma base quantitativa para a comparação entre as diferentes passadas de fresamento.

Conclusão

O presente trabalho permitiu desenvolver e aplicar uma metodologia de processamento digital de imagens para caracterizar a assinatura óptica da superfície fresada do aço inoxidável dúplex UNS S31803. A utilização do ImageJ, associada à calibração espacial, à conversão para escala de cinza e à Transformada Rápida de Fourier, possibilitou converter características visuais da superfície em descritores quantitativos de intensidade, frequência e periodicidade. O espectro de magnitude apresentou uma faixa de intensidade com orientação preferencial, evidenciando a direcionalidade da textura produzida pelo fresamento. A análise do perfil espectral resultou em frequência dominante de 36,48 ciclos/mm, periodicidade equivalente de 27,42 µm, intensidade média da banda dominante de 161,475 e índice espectral normalizado de 0,246. Esses valores constituem a assinatura óptica da superfície analisada e demonstram que a metodologia é capaz de identificar e quantificar padrões periódicos presentes nas marcas de usinagem. Conclui-se, portanto, que a FFT constitui uma ferramenta promissora para a caracterização indireta de alterações superficiais produzidas durante o fresamento. Entretanto, os descritores ópticos obtidos não representam diretamente valores de tensão residual em MPa. Para estabelecer essa relação, será necessário aplicar o mesmo protocolo às demais passadas, realizar repetições experimentais e correlacionar os resultados com medições de tensão residual obtidas por uma técnica de referência. A metodologia desenvolvida estabelece uma base para futuros estudos voltados à criação de um procedimento óptico de baixo custo, rápido e não destrutivo, destinado ao monitoramento da integridade superficial de componentes usinados. Com sua posterior validação experimental e estatística, os descritores extraídos poderão contribuir para a identificação de tendências associadas ao estado de tensão residual e para o desenvolvimento de sistemas inteligentes de apoio ao controle dos processos de usinagem.

Referências

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. **Digital image processing**. 4. ed. New York: Pearson, 2018.

JAWAHIR, I. S. et al. **Surface integrity in material removal processes: recent advances**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, v. 60, n. 2, p. 603–626, 2011.

M'SAOUBI, R. et al. **A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, v. 57, n. 2, p. 745–768, 2008.

ALVAREZ-ARMAS, Iris; DEGALLAIX-MOREUIL, Suzanne (ed.). ***Duplex stainless steels***. London: ISTE; Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

GUNN, Robert N.; **Duplex, stainless steels: microstructure, properties and applications.** Cambridge: Woodhead Publishing, 1997.

SCHNEIDER, Caroline A.; RASBAND, Wayne S.; ELICEIRI, Kevin W.; **NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis.** Nature Methods, v. 9, n. 7, p. 671–675, 2012. DOI: 10.1038/nmeth.2089.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da equipe de coordenação e auxiliares técnicos da FATEC de Pindamonhangaba e especial o senhor Laerte Luiz.