

CORRELAÇÃO ENTRE ENERGIA ELÉTRICA E IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA

Paulo Vinícius da Silva Resende^{1,2}, paulo.vinicius@ifg.edu.br
Fábio Isaac Ferreira⁴, fab.kf@hotmail.com
Geovanne Pereira Furriel³, geovanne.furriel@ifgoiano.edu.br
Rosemar Batista da Silva², rosemar.silva@ufu.br

¹Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, R. 75, nº46 - Centro, Goiânia – GO.

²Universidade Federal de Uberlândia – FEMEC. Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica, Uberlândia – MG.

³Instituto Federal Goiano - Campus Trindade. Av. Wilton Monteiro da Rocha, s/n - St. Cristina II, Trindade – GO.

⁴Universidade Estadual Paulista – UNESP. A. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 – Vargem limpa, Bauru – SP.

Resumo. A retificação cilíndrica de mergulho visa conferir às superfícies de revolução a combinação entre bom acabamento e tolerâncias dimensionais estreitas, sobretudo àquelas fabricadas em materiais endurecidos. Por se tratar de um processo cuja ferramenta é refratária e que resulta em elevada energia específica, a maior parcela de calor é direcionada à peça, o que potencializa a ocorrência de danos e alterações metalúrgicas indesejáveis. Por esse motivo, o monitoramento do processo e da integridade superficial são fundamentais para garantir a qualidade do produto acabado, principalmente com emprego de técnicas não destrutivas. Neste contexto, este trabalho visa avaliar a correlação entre a energia elétrica dissipada durante a retificação de mergulho de amostras de aço SAE 52100 e índices de dano obtidos da impedância eletromecânica (IEM). Os testes foram realizados com rebolo convencional de Al_2O_3 branco e dois valores de velocidade da peça (V_w) e de penetração de trabalho (ae). Constatou-se que o parâmetro ae exerce maior influência sobre a energia elétrica que V_w dentro da faixa estudada. Ainda, forte correlação entre energia e o índice CCMD foi observada nas faixas de 65 a 70 kHz e 100 a 105 kHz, enquanto o índice RMSD foi sensível apenas ao parâmetro ae na faixa de 20 a 40 kHz.

Palavras chave: Retificação cilíndrica, transdutores piezoelétricos, impedância eletromecânica.

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão que visa conferir aos componentes usinados a combinação entre bom acabamento ($Ra < 1,6 \mu m$) e tolerâncias dimensionais estreitas de IT6 a IT3. Neste processo há o emprego de uma ferramenta abrasiva, conhecida como rebolo, composta por diversas partículas abrasivas, não metálicas, de elevada dureza, dispostas aleatoriamente, com geometria indefinida e múltiplas arestas de corte (MACHADO *et al.*, 2009).

Marinescu (2007) cita que a retificação tem como vantagem a usinagem de materiais de elevada dureza, dúcteis ou frágeis com as características dimensionais e geométricas que normalmente não poderiam ser obtidas por processos convencionais de usinagem que empregam ferramentas de geometria definida, por exemplo, o torneamento. Nesse sentido, a gama de produtos que demandam retificação na indústria metalomecânica é extensa, sobretudo na fabricação de componentes de revolução, como eixos virabrequins e de comando de válvula, mancais, pinos, eixos, flanges e buchas.

Segundo Rowe (2014), nos processos de retificação, a maior parte do calor gerado pela remoção de material é concentrado na peça, uma vez que o rebolo é pobre condutor de calor e o cavaco é formado por diversos segmentos de massa muito pequena em virtude dos baixos valores de penetração de trabalho empregados. Por essa razão, Jia *et al.* (2014) citam que o calor direcionado à peça afeta a qualidade da superfície usinada, a começar pelas alterações microestruturais que prejudicam as propriedades mecânicas do componente, como a resistência à fadiga, surgimento de queima superficial e trincas, como também pode aumentar os desvios micro e macrogeométricos.

O aço SAE 52100 ocupa uma posição de destaque em aplicações na indústria metalomecânica devido à sua composição química e propriedades mecânicas. Ele é formado por uma liga ternária Fe-Cr-C de boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e boa temperabilidade, com ampla utilização na fabricação de rolamentos em estado metalúrgico endurecido (MORAES *et al.*, 2019; CHIAVERINI, 1988). Contudo, as propriedades deste aço o tornam altamente suscetível aos danos de origem térmica durante a retificação com abrasivos convencionais, com destaque para trincas, queima de retífica e variação excessiva de microdureza em regiões próximas à superfície retificada. Alterações metalúrgicas deste material também têm sido relatadas ao retificá-lo utilizando rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3). Entre as alterações observadas, destacam-se a formação de martensita não revenida (camada branca) e revenimento excessivo (camada escura), o qual normalmente ocorre em regiões abaixo da camada branca (DE PAIVA *et al.*, 2020), podendo levar ao refugo da peça que se encontra no final da cadeia de fabricação e, conseqüentemente, gerando prejuízos.

Esses aspectos também foram estudados recentemente por Madopothula *et al.* (2018) na retificação cilíndrica do aço rolamento, no qual a espessura de camada branca mostrou-se diretamente proporcional à quantidade de passes de retificação com a utilização do rebolo Al_2O_3 Sol-Gel, atingindo 56 μm abaixo da superfície retificada. Os autores destacaram a importância de monitorar esse tipo de dano que, na maioria das vezes, não é perceptível a olho nu na superfície da peça.

Em outro trabalho, He *et al.* (2019) estudaram as técnicas, vantagens e limitações de diferentes métodos para o monitoramento da queima de retífica em materiais metálicos, os quais foram divididos em dois grupos. O primeiro, formado pelos métodos indiretos, buscam correlações de parâmetros do processo, como força, temperatura e potência, com características da superfície retificada, como rugosidade e microdureza. No segundo grupo, técnicas de inspeção por métodos diretos foram analisadas, em que características físicas, químicas, mecânicas ou eletromagnéticas do material usinado são medidas, permitindo inferir qualitativa e quantitativamente a superfície retificada. Além disso, os métodos diretos podem utilizar ensaios não destrutivos ou destrutivos. Ensaios não destrutivos, como ultrassom, partículas magnéticas, corrente de Foucault e ruído de Barkhausen, identificam e/ou indicam descontinuidades físicas ou de propriedades do material da peça. Já nos ensaios destrutivos, como microscopia óptica, metalografia, microdureza de perfis ou superfície e estado de tensões residuais, são utilizados fragmentos ou amostras da peça.

O monitoramento de grandezas elétricas durante a retificação tem demonstrado aplicação relevante no meio científico e industrial. Na retificação cilíndrica do aço rolamento, o estudo de Li *et al.* (2012) observou forte correlação entre a energia específica de retificação (SEC [kJ/cm^3]) e o parâmetro de rugosidade R_z com o emprego de rebolo convencional Al_2O_3 . Os autores pontuam que a grandeza SEC permite quantificar a energia elétrica consumida por volume de material removido com o emprego de diferentes parâmetros de corte, tipo de rebolo e condição de lubrificação, servindo-se como indicador de severidade do processo. Tian *et al.* (2017) desenvolveram um sistema de aquisição de sinais elétricos dedicado ao processo de retificação plana capaz de extrair características do processo de remoção de material por meio de ferramentas analíticas e processamento das grandezas elétricas *in situ*. Além disso, alguns fabricantes do segmento de abrasivos comercializam sistemas de monitoramento customizados ao processo, como a solução Field Instrumentation System (FIS) da Saint-Gobain Abrasives®.

Ainda nesse contexto, destaca-se a impedância eletromecânica (IEM) como um método indireto de monitoramento da integridade estrutural ainda pouco explorado na retificação. Cavalini *et al.* (2014) descrevem que o método consiste em realizar medições da impedância elétrica do transdutor piezoelétrico colado ou embutido na superfície. A partir do cálculo de parâmetros estatísticos, métricas ou índices de danos, quantificam-se as alterações entre os sinais obtidos sequencialmente dentro de uma faixa de frequência, pois a impedância elétrica do transdutor Z_E é diretamente proporcional à impedância mecânica da estrutura ou peça monitorada Z_s .

O trabalho pioneiro para esta aplicação foi realizado por Marchi *et al.* (2015) no processo de retificação plana do aço AISI 1020. Os autores concluíram que o incremento da penetração de trabalho ae de 10 μm a 100 μm elevou o parâmetro de rugosidade média R_a e resultou na queima de retífica em aspecto visual da superfície progressivamente. As assinaturas obtidas pela técnica IEM foram alteradas em cada condição experimental, uma vez que os índices de dano RMSD e CCDM na parte real do sinal aumentaram de acordo com a penetração de trabalho, entre a faixa de frequência de 10 a 100 kHz. Entretanto, os autores não apresentaram análises estatísticas de correlação entre as variáveis de saída mensuradas e nem analisaram outros aspectos de parâmetros de integridade de superfície.

Posteriormente, Silva *et al.* (2018) investigaram danos superficiais gerados pela retificação plana do aço ABNT N2711 através da aquisição de sinais de IEM para casos de variação da velocidade da peça V_w e da penetração de trabalho ae . Como resultado, eles relataram que a rugosidade e a microdureza foram prejudicadas à medida que ae foi aumentada, ao passo que V_w não apresentou influência significativa sobre a rugosidade e microdureza. Já para as medições de IEM, os autores observaram que o índice CCDM calculado para aparte real na banda de frequência de 65 a 75 kHz foi sensível às variações de ae , sugerindo, assim, um potencial indicador para o monitoramento da rugosidade e potência elétrica. De maneira análoga, os autores não exploraram as medidas de correlação e o ajuste de dados estatisticamente.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é estudar a correlação entre a energia elétrica consumida pelo motor do rebolo e a impedância eletromecânica obtida por diafragmas piezoelétricos durante a retificação cilíndrica do aço rolamento SAE 52100. Para uma taxa de remoção de material constante, a energia elétrica dispendida no ciclo do processo pode ser comparada entre os ensaios como indicador de severidade e sua implicação nos índices de impedância.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de retificação foram realizados em uma retificadora cilíndrica semiautomática do fabricante Ferdimat, modelo UA61, com rotação do rebolo constante igual a 1760 rpm e potência mecânica instalada de 3,5 kW. Foi utilizado um rebolo de óxido de alumínio branco (AA46K6VK) com dimensões de 350 mm x 127 mm x 25 mm do fabricante Saint Gobain Abrasives®. O rebolo foi dressado antes de cada ensaio, com dressador de diamante sintético de 0,5 ct do fabricante Rocast, sendo monitorado o raio de ponta e a largura de dressagem em cada operação para obter grau de recobrimento $U_d = 3$.

Foram utilizadas amostras cilíndricas (anéis) de aço SAE 52100 no estado temperado e revenido com dureza de 60 ± 2 HRC, com diâmetro externo de 68 mm, 8 mm de espessura e furo Cone Morse nº 3 para montagem no eixo entre pontas, como detalhado na Fig. 1.

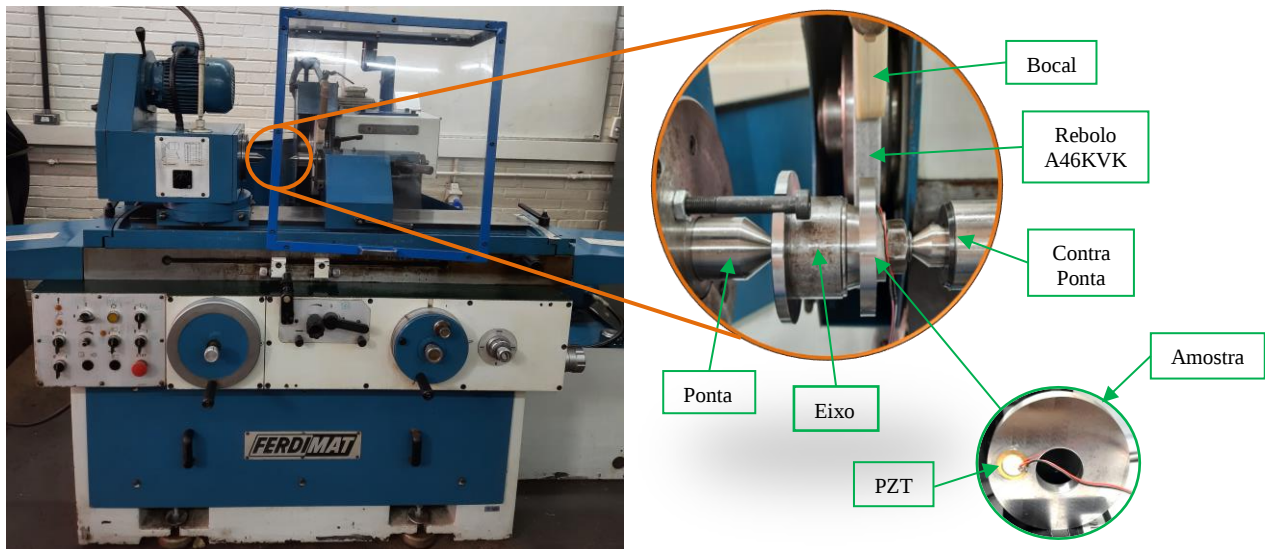


Figura 1. Aparato experimental: Retificadora e fixação da peça entre pontas.

Foi realizado um Planejamento Fatorial 2k (FFD) com intuito de avaliar o efeito que os parâmetros de entrada (penetração de trabalho e velocidade da peça) provocam nas grandezas elétricas de retificação (tensão elétrica, corrente elétrica, potência elétrica e energia elétrica) e nos parâmetros de IEM para a probabilidade de abrangência de 95 % e p – valor $< 0,05$ como critério da Análise de Variância (Anova). O resumo das condições de retificação utilizadas e os dados do processo estão dispostos na Tab. 1, sendo padronizado o tempo de centelhamento (*spark-out*) $t_s = 4$ segundos. Sendo assim, o tempo do ciclo teórico t_{ct} compreende no período entre o toque do rebolo, o avanço radial até a penetração de trabalho estipulada e o centelhamento.

Tabela 1. Condições de corte empregadas nos ensaios de retificação.

Condição	Fator A- Penetração de trabalho ae (μm)	Fator B - Velocidade da Peça V_w (m/min)	Tempo do ciclo teórico t_{ct} (segundos)
C1	100 ± 5	$15,0 \pm 0,6$	12,0
C2	200 ± 5	$15,0 \pm 0,6$	20,0
C3	100 ± 5	$30,0 \pm 0,4$	12,0
C4	200 ± 5	$30,0 \pm 0,4$	20,0
Velocidade de Mergulho - v_f		$(0,75 \pm 0,08)$ mm/min	
Rebolo e grau de recobrimento – U_d		38A46KVK com $U_d = 3$	
		$V_s = (30,0 \pm 0,3)$ m/s	
Lubrificrefrigeração		Abundante, Vasco 7000 (1:19) à vazão de 7 L/min	

Para medição da Energia Elétrica (E_p) no ciclo de retificação, utilizou-se um sistema de medição composto por três sensores de tensão (ST1, ST2 e ST3), modelo LV25-P, e três sensores corrente (SC1, SC2, SC3) do tipo *hall*, modelo LA50-P, amplificador de sinais e uma placa de aquisição do fabricante National Instruments®, modelo NI-USB-6009. Os sinais foram adquiridos em taxa de 1 kHz por canal, posteriormente processados por meio de uma rotina no Scilab® no período referente ao ciclo da retificação de mergulho.

A sequência das etapas, desde a preparação das amostras até a obtenção das variáveis de saída utilizadas neste trabalho, é apresentada no fluxograma na Fig. 2.

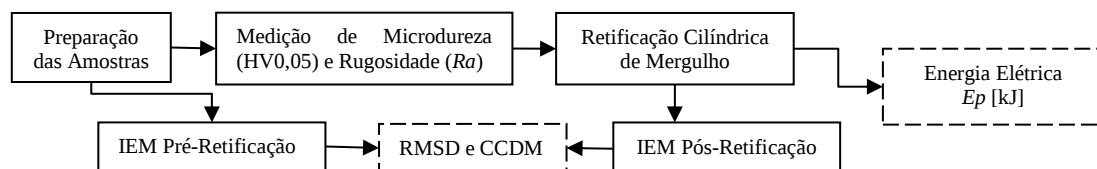


Figura 2. Sequência de realização dos testes e medições

Para medição da IEM, utilizou-se uma placa de aquisição da National Instruments®, modelo NI-6216, com excitação de 0 a 140 kHz e frequência de amostragem de 400 kS/s, conforme a metodologia de SILVA *et al.* (2018) esquematizada na Fig. 3. Em cada amostra, um diafragma piezoelétrico (PZT) do modelo 7BB-15-6 do fabricante Murata® foi colado à face do anel por adesivo instantâneo à base de etilcianocrilato, TekBond® 721. Em seguida, foi aplicada uma camada de silicone em torno do diafragma com o intuito de isolar o contato direto com fluido de corte do processo de retificação. Após 24 horas do procedimento de colagem, foi realizada a primeira medição de IEM, além de duas réplicas em intervalo

de 4 horas à temperatura ambiente de $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$, definindo-os como IEM Pré-Retificação. Após cada teste de retificação o procedimento foi repetido, sendo denominado IEM Pós-Retificação. Em ambos os casos, os índices de dano foram calculados dentro do espectro de frequências de 0 a 135 kHz, discretizado em intervalos de 5 kHz totalizando 27 bandas de frequência.

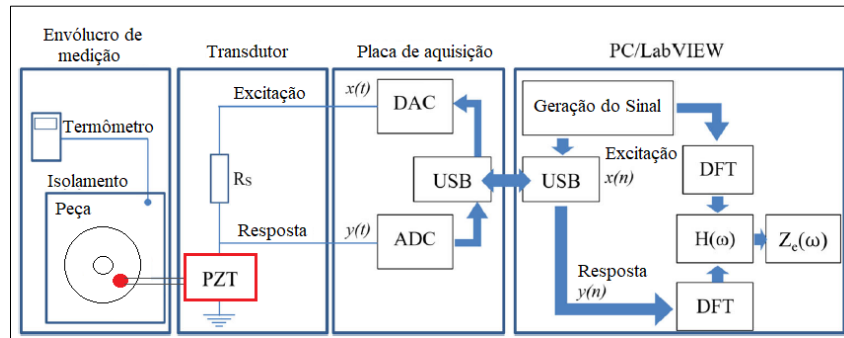


Figura 3: Esquema do sistema de medição de IEM nas peças em cada estágio
Adaptado de: Silva *et al.* (2018)

2.1 Grandezas Elétricas dos Sistemas Trifásicos

De acordo com WEG (2019), no motor elétrico de indução trifásica não há apenas a atuação da componente de potência elétrica ativa, que é convertida em trabalho mecânico e calor (perdas), mas também potência reativa, necessária para magnetização, mas que não produz trabalho. No diagrama da Fig. 4 (a), o vetor P representa a potência ativa [W], enquanto o Q a potência reativa [VAr], que somadas vetorialmente resultam na potência aparente S [VA].

No presente trabalho, foram obtidos os sinais das três fases (a, b, c) de tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ na linha de alimentação elétrica do motor do rebolo, como detalhado na Fig. 4 (b). A potência ativa P [W] corresponde à parcela da potência aparente que executa trabalho e é associada com a potência mecânica disponível no eixo, obtida a partir da integração entre as respectivas tensões e correntes no domínio do tempo no período T [s], ou simplesmente pela média aritmética da curva de potência instantânea P_i , composta por N amostras do sinal, conforme Eq (1).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [v_a(t) \cdot i_a(t) + v_b(t) \cdot i_b(t) + v_c(t) \cdot i_c(t)] dt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_{ai} \cdot i_{ai} + v_{bi} \cdot i_{bi} + v_{ci} \cdot i_{ci}) \quad (1)$$

Onde v_{ai}, v_{bi}, v_{ci} são os valores de tensão elétrica da amostra i do sinal e i_{ai}, i_{bi}, i_{ci} são os valores de corrente elétrica da amostragem i do sinal, ambas obtidas no circuito de alimentação do motor elétrico do rebolo (Fig. 4 (b)).

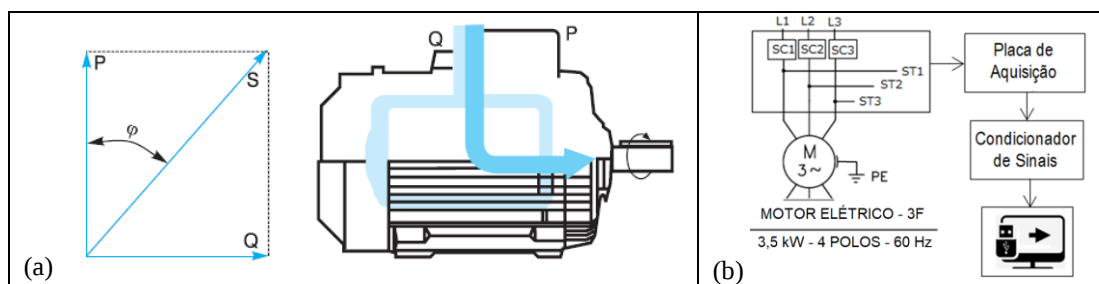


Figura 4: Triângulo de potências para o motor trifásico de indução (a), sistema de aquisição de potência (b).
Adaptado de: WEG (2019)

A Energia Ativa durante o mergulho E_p [kJ] como grandeza elétrica para correlação com a impedância (IEM) da peça. Por definição, a energia é calculada no produto da potência ativa Eq. (1), parcela destinada à realização de trabalho, pelo intervalo Δt , em segundo, conforme Eq. (2).

$$E_p = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{ai} \cdot i_{ai} + v_{bi} \cdot i_{bi} + v_{ci} \cdot i_{ci} \right) \cdot \Delta t \quad (2)$$

No trabalho de Li et al. (2012) os autores estudaram diferentes condições de retificação cilíndrica por meio da energia específica de retificação SEC [kJ/mm³], obtida pela razão entre a potência ativa P [W], descrita na Eq. 1, e a taxa de remoção de material [mm³/s], conforme:

$$SEC = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i}{Q} = \frac{P}{\pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot a_p} \quad (3)$$

Onde: d_w é o diâmetro da peça, v_f é a velocidade de mergulho e a_p é a profundidade de corte, neste caso a largura da peça.

O ciclo de retificação de mergulho compreende no avanço radial do rebolo contra a peça em rotação até que a penetração de trabalho ajustada a_e seja atingida, seguido do tempo de centelhamento e o recuo do rebolo. No presente trabalho, a taxa de remoção de material foi mantida constante, o que permite a avaliação do processo pela energia elétrica da Eq. (2).

2.2 Aplicação da Técnica de Impedância Eletromecânica (IEM)

Baseado nos trabalhos de Baptista e Filho (2011) e Silva *et al.* (2018), neste trabalho foram utilizados os índices de dano RMSD e CCDM. O primeiro, do Inglês *Root-Mean-Square Deviation*, em Português Desvio da Raiz Média Quadrática, é obtido pela Eq. 3 e representa a distância euclidiana entre a amplitude dos pontos amostrados da assinatura adotada como referência (condição saudável $Z_{E,H}$) e a após ocorrência de dano ($Z_{E,D}$). Para a técnica da IEM, dano é definido como qualquer alteração na estrutura que a diferencie da situação de referência (condição saudável). Os índices de dano podem ser calculados para a magnitude, parte real ou parte imaginária da IEM, dentro de uma faixa de frequência da avaliação de ω_1 a ω_F . A segunda, do Inglês *Correlation Coefficient Deviation Metric*, em Português Desvio do Coeficiente de Correlação, está relacionado ao coeficiente de correlação entre as duas assinaturas, calculada pela Eq. 4, composto pela razão entre a covariância de $Z_{E,D}$ e $Z_{E,H}$ e o desvio padrão dos pontos amostrados no sinal de referência (σ_1) e após a ocorrência de dano (σ_2).

$$RMSD = \sum_{k=\omega_1}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[Z_{E,D}(k) - Z_{E,H}(k)]^2}{Z_{E,H}^2(k)}} \quad (4)$$

$$CCDM = 1 - \frac{cov[Z_{E,H}(k), Z_{E,D}(\omega)]}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (5)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 5 (a) são apresentados os resultados da potência instantânea P_i [W] calculada a partir da Eq. (1) para as condições experimentais C1 e C3, com destaque para ciclo de retificação na janela delineada em vermelho. Nota-se que as curvas apresentam valores de pico semelhantes, em torno de 1,65 kW, cujas médias de potência ativa P [W] estão contidas entre si em torno do desvio, ou seja, são estatisticamente iguais. Na Figura 5 (b) é apresentada a amplitude da energia E_p [kJ] obtida pela Eq. (2) para as quatro condições. A condição C3, na qual empregou-se a velocidade da peça $V_w = 30$ m/min, foi em média 28 % menor se comparada à C1 com $V_w = 15$ m/min. O comportamento de redução da energia em função do aumento de V_w foi observado em menor amplitude (7 %) entre as condições C2 e C4 em que a penetração de trabalho a_e foi de 200 μ m.

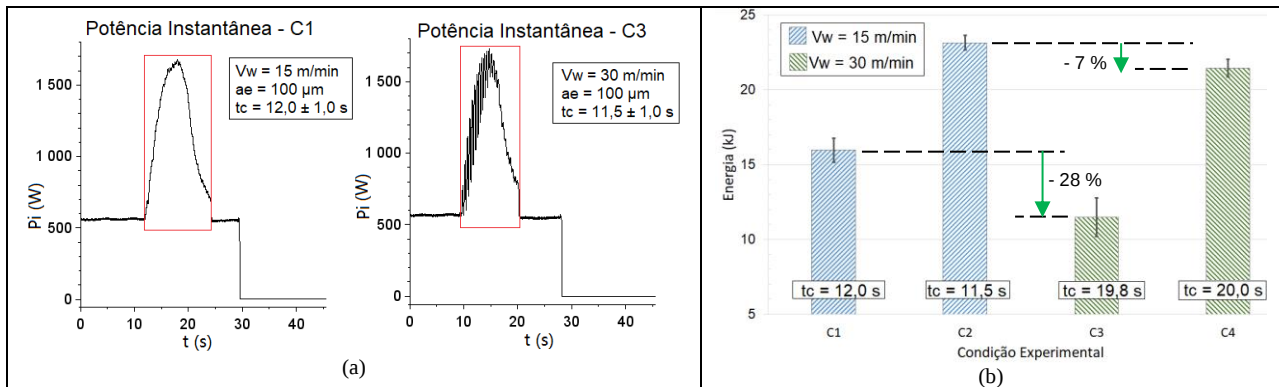


Figura 5: Curva de Potência Instantânea P_i das condições C1 e C3 (a), Energia elétrica E_p durante a retificação para todas as condições (b).

Segundo Rowe (2014) ao aumentar V_w com os demais parâmetros de corte constantes, a redução da energia específica de corte é atribuída à menor taxa de avanço radial do rebolo contra a peça, ou seja, a penetração de trabalho real a cada

volta completa da peça é reduzida em virtude da maior rotação da peça. O autor ainda destaca que o aumento da velocidade da peça é indicado dentro de uma região de estabilidade, tendo em vista a ocorrência vibrações excessivas e deterioração o acabamento da peça.

Por outro lado, comparando aos pares as condições C1-C2 e C3-C4, o aumento da energia de retificação é resultado da penetração de trabalho a_e de 100 μm para 200 μm . Logo, a condição C2 resultou em um ciclo de retificação com tempo $t_c = (19,8 \pm 1,0)$ s., enquanto a condição C1 registrou $t_c = (12,0 \pm 1,0)$ s. Na retificação de mergulho, quando o rebolo toca a peça e inicia o movimento de avanço radial, o conjunto rebolo-peça deforma-se elasticamente, fazendo com que o avanço por volta não seja real. À medida que o processo progride, após algumas voltas do rebolo, o avanço real se iguala ao avanço ajustado na máquina, mas a diferença entre a profundidade de corte real e teórica permanece (DINIZ *et al.*, 2003).

Quanto aos efeitos da mudança de nível das variáveis na amplitude da energia E_p , a significância de V_w atingiu p -valor = $6,0 \cdot 10^{-2}$, enquanto para a_e obteve-se p -valor = $7,3 \cdot 10^{-5}$. O maior tempo do ciclo nas condições C2 e C4 comparado respectivamente à C1 e C3, implica em maior energia elétrica E_p , pois área abaixo da curva de potência instantânea P_i

Na Figura 6 (a), é apresentado o índice CCDM para o espectro de frequências de 0 a 135 kHz da parte real do sinal de IEM, discretizado em intervalos de 5 kHz, totalizando 27 bandas de frequência. No presente trabalho, adotou-se como correlação forte aquela cujo coeficiente de Pearson r satisfaz seguinte relação: $0,90 < r < -0,90$. Verificou-se que o índice CCDM da parte real nas faixas de 65 a 70 kHz (14ª banda) e de 100 a 105 kHz (21ª banda) resultou em correlação forte com a energia elétrica E_p , respectivamente com $r = 0,95$ e $r = 0,91$. Na Figura 6 (b), é apresentada graficamente a correlação entre o índice CCDM calculado para a parte real da impedância e a energia elétrica, para as duas bandas com a respectiva equação de predição e coeficiente de ajuste R^2 , que indicam o ajuste dos pontos amostrais ao modelo linear.

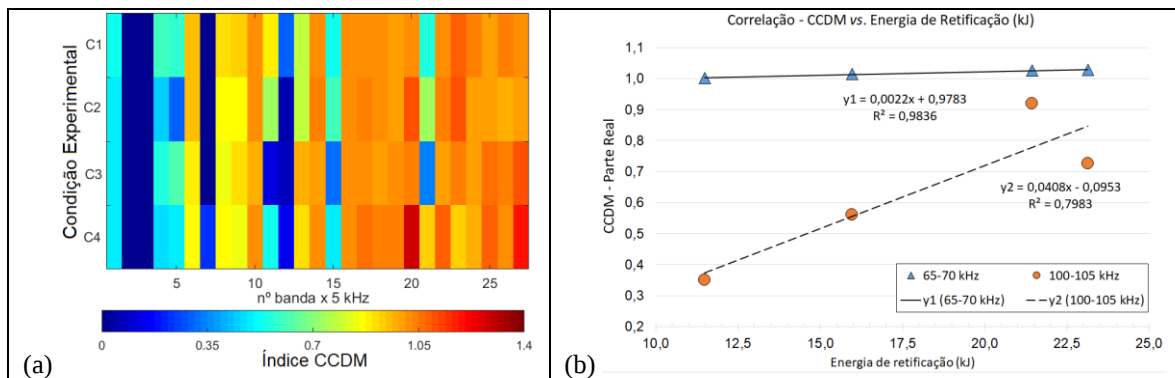


Figura 6: Resultados de IEM: Índice CCDM calculado para a parte real da impedância para as condições experimentais (a), correlação entre energia E_p e CCDM para duas faixas de frequência (b).

A parte imaginária dos sinais de IEM não apresentou correlação forte com nenhuma das variáveis de resposta avaliadas. No estudo de Ferreira *et al.* (2020), no qual método IEM foi empregado no monitoramento de danos causados pela retificação plana do aço ABNT N2711, os autores observaram que a parte imaginária dos sinais de IEM não varia significativamente antes e após a retificação, tornando-se ineficaz para o monitoramento da integridade estrutural. Os autores ainda recomendam que frequências abaixo de 15 kHz sejam desconsideradas da análise em virtude de interferências externas e ruídos da medição.

Devido a variação das condições experimentais e por cada amostra ser composta de uma impedância mecânica Z_s , as métricas foram avaliadas em seu valor absoluto. No trabalho experimental de monitoramento de danos térmicos em retificação conduzido por Ferreira *et al.* (2020), os autores encontraram correlação diretamente proporcional ($r = 0,99$) entre a métrica CCDM e a espessura de corte equivalente (heq) em frequências intermediárias dos sinais de IEM (65 a 90 kHz). De maneira análoga à energia elétrica E_p , a grandeza heq é um parâmetro que permite quantificar a severidade da condição de retificação por se tratar da espessura da camada de material removida pelo rebolo em uma volta completa.

É ilustrado na Figura 7 (a) a parte real dos sinais de IEM para a condição C1, sendo a curva tracejada em vermelho a situação Pré-Retificação, a curva em azul Pós-Retificação e, em verde, com o PZT solto. O acréscimo de amplitude perceptível visualmente na faixa de 20 a 35 kHz e 55 a 65 kHz sugerem uma relação com a impedância mecânica Z_s , pois, na situação com PZT solto, Z_s tende a zero, ou seja, equivale apenas à pequena massa do disco de metal do PZT. Como resultado, essa variação foi perceptível nas condições de retificação, visto que na métrica RMSD, ilustrada no mapa de cores na Fig.7 (b), observou-se a correlação linear forte entre a penetração de trabalho ae e o aumento da métrica RMSD na faixa de 20 a 40 kHz (4^a à 8^a banda) com $r = 0,98$.

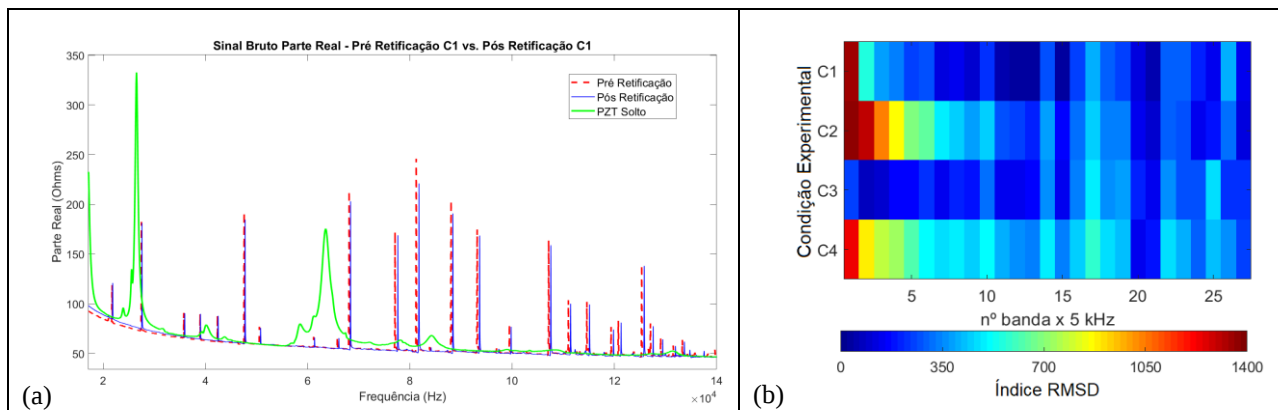


Figura 7: Resultados de IEM: Parte real do sinal na condição C1 (a), métrica RMSD para todas as condições (b).

Esse resultado condiz com o que é normalmente relatado na literatura, com destaque para o trabalho de Palomino *et al.* (2011), em que os autores constataram a robustez da métrica RMSD3, aqui denominada RMSD, para detecção de perda ou adesão de massa em estruturas metálicas de alumínio por meio da técnica de IEM entre 30 e 60 kHz na parte real dos sinais. Vale ressaltar que este assunto será explorado em trabalhos futuros para verificar a sensibilidade da métrica em face da influência das variáveis de retificação que afetam este controle, tais como o desgaste do rebolo em sucessivas passadas de retificação.

4. CONCLUSÕES

Após a aplicação da metodologia de medição de impedância eletromecânica (IEM) e a realização dos ensaios de retificação cilíndrica do aço SAE 52100 com diferentes condições e monitoramento das grandezas elétricas, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- O aumento da velocidade da peça com a taxa de remoção de material constante implicou na redução da energia E_p em até 28 % por ciclo de retificação, sendo necessário considerar os efeitos na qualidade superficial não explorados neste trabalho;
- O índice CCMD apresentou correlação forte com a energia elétrica do ciclo de mergulho nas condições experimentais para as faixas de frequência de 65 a 70 kHz e 100 a 105 kHz, o que indica um potencial método de estimação e predição no monitoramento da energia dispendida pelo processo;
- O índice RMSD apresentou correlação forte com a penetração de trabalho ae na faixa de 20 a 40 kHz, o que será estudado em trabalhos futuros ao monitoramento metrológico da peça, relacionando-o aos desvios geométricos e dimensionais.

Portanto, um sistema de monitoramento capaz de inferir a energia elétrica no processo da retificação cilíndrica utilizando a técnica da impedância eletromecânica demonstra capacidade de monitorar as características do processo em função dos parâmetros de retificação empregados, bem como da própria peça.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Laboratórios de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e Usinagem Convencional (LUC) ambos da FEMEC, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Alguns autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), via Edital 01/2016 – Demanda Universal – Processo Nº: TEC-APQ-01119-16, e ao CNPq – Processos Nº. 426018/2018-4 (Edital Universal) e Nº: 310264/2019-7 (Bolsa de Produtividade em Pesquisa) pelo apoio financeiro que permitiram o desenvolvimento deste trabalho, bem como à Fundação de Apoio Universitário -Processo de Chamada Pública Nº 02/2018 pelo apoio financeiro. Paulo Vinicius agradece ao Instituto Federal de Goiás – Campus Goiânia - pela licença para afastamento para cursar Mestrado e pela parceria.

6. REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, F.G., FILHO, J. V., 2011. Piezoelectric transducers applied in structural health monitoring: data acquisition and virtual instrumentation for electromechanical impedance technique. In: InTech, Dr. Farzad. pp 105–128
- BIANCHI, E. C., RODRIGUEZ, R. L., HILDEBRANDT, R. A., *et al.*, 2018. “Plunge cylindrical grinding with the minimum quantity lubrication coolant technique assisted with wheel cleaning system”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 95, n. 5–8, p. 2907–2916.
- CAVALINI, A., NETO, R. M. F., STEFFEN, V., 2014. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Berlin: Springer International Publishing, v. 01.

- DA SILVA, R. B., FERREIRA, F. I., BAPTISTA, F. G., DE AGUIAR, P. R., DE SOUZA RUZZI, R., HUBNER, H. B., BIANCHI, E. C., 2018. "Electromechanical impedance (EMI) technique as alternative to monitor workpiece surface damages after the grinding operation". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(9-12).
- DE PAIVA, R.L., DE SOUZA RUZZI, R., DE OLIVEIRA, L.R. *et al.*, 2020. "Experimental study of the influence of graphene platelets on the performance of grinding of SAE 52100 steel". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–12.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos metais*. Campinas, SP, Brasil: Editora Artliber, 4ª edição.
- FERREIRA, F.I., DE AGUIAR, P.R., DA SILVA, R.B. *et al.*, 2020. "Electromechanical impedance (EMI) measurements to infer features from the grinding process". *International Journal of Advances Manufacturing Technology* 106, 2035–2048.
- HE, B., WEI, C., DING, S.; SHI, Z., 2019. "A survey of methods for detecting metallic grinding burn". *Measurement*, v. 134, p. 426–439.
- LI, W., WINTER, M., KARA, S., HERRMANN, C., 2012. "Eco-efficiency of manufacturing processes: A grinding case". *CIRP annals*, 61(1), 59-62.
- MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., SILVA, M. B., COELHO, R. T., 2009. *Teoria da usinagem dos materiais*. São Paulo: Editora Blucher, 1ª edição.
- MALKIN, S.; GUO, C., 2008. *Grinding Technology Theory & Application of Machining with Abrasives*. Industrial Press INC, 2ª edição.
- MADOPOTHULA, U., NIMMAGADDA, R. B., LAKSHMANAN, V., 2018. "Assessment of white layer in hardened AISI 52100 steel and its prediction using grinding power". *Machining Science and Technology*, 22(2), 299-319.
- MARCHI, M., BAPTISTA, F. G., AGUIAR P.R., BIANCHI, C. E., 2015. "Grinding process monitoring based on electromechanical impedance measurements". *Measurement Science and Technology* vol. 26 n. 4.
- MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B.; INASAKI, I., 2007. *Handbook of machining with grinding wheels*. CRC Press; 1ª edição.
- PALOMINO, L. V., DE MOURA JR, J. D. R. V., TSURUTA, K. M., RADE, D. A., & STEFFEN JR, V., 2011. "Impedance-based health monitoring and mechanical testing of structures". *Smart structures and systems*, 15-25.
- ROWE, W. B. *Principles of Modern Grinding Technology*. Elsevier, 2014.
- TIAN, Y. B., LIU, F., WANG, Y., WU, H. "Development of portable power monitoring system and grinding analytical tool". *Journal of Manufacturing Processes*, v. 27, p. 188–197, 2017.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

CORRELATION BETWEEN ELECTRICAL ENERGY AND ELECTROMECHANICAL IMPEDANCE (EMI) IN CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING.

Paulo Vinicius da Silva Resende^{1,2}, paulo.vinicius@ifg.edu.br

Fábio Isaac Ferreira⁴, fab.kf@hotmail.com

Geovanne Pereira Furriel³, geovanne.furriel@ifgoiano.edu.br

Rosemar Batista da Silva², rosemar.silva@ufu.br

¹Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, R. 75, nº46 - Centro, Goiânia – GO.

²Universidade Federal de Uberlândia – FEMEC. Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica, Uberlândia – MG.

³Instituto Federal Goiano - Campus Trindade. Av. Wilton Monteiro da Rocha, s/n - St. Cristina II, Trindade – GO.

⁴Universidade Estadual Paulista – UNESP. A. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 – Vargem limpa, Bauru – SP.

Abstract. Cylindrical plunge grinding aims to give surfaces of revolution at low surface roughness and tight tolerances, especially of hardened materials. As it is a process whose tool is refractory and which results in a high specific energy, the largest portion of heat is directed to the workpiece, which enhances the occurrence of damage and undesirable metallurgical changes. For this reason, monitoring of the process and surface integrity are essential to obtain high quality parts, especially with the use of non-destructive techniques. In this context, this work aims to evaluate the correlation between and electric energy in SAE 52100 steel plunge grinding and two damage metrics in Electromechanical Impedance (IEM). The tests were carried out with a conventional white Al203 grinding wheel and two values of part speed " V_w " and working penetration " ae ". Electric energy showed a predominant influence due to the " ae " variation and strong correlation with the CCDM metric in the 65 to 70 kHz and 100 to 105 kHz bands, while the RMSD metric was sensitive only to " ae " at lower frequencies, of 20 at 40 kHz.

Keywords: Plunge Grinding, Piezoelectricity, Electromechanical Impedance.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.