

Avaliação do diafragma piezelétrico de baixo custo no monitoramento do processo de retificação plana tangencial

Luiz Felipe Gilli Fabiano¹, Danilo Marcus Santos Ribeiro²,
Pedro Oliveira Conceição Junior², Kauê Luís Oliveira da Silva²,
Paulo Roberto de Aguiar², Eduardo Carlos Bianchi¹

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Bauru, SP
e-mail: luiz_gilli@hotmail.com

²Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia Elétrica, Campus Bauru, SP e-mail: dan-pyne16@msn.com.br; pedroliveira931@hotmail.com; kauluiseng@gmail.com; aguiarpr@feb.unesp.br; bianchi@feb.unesp.br

RESUMO

Os processos de usinagem são de extrema importância para a fabricação de peças mecânicas, as peças exigem alta precisão dimensional e geométrica e qualidade em sua construção. Dentre os processos de usinagem, o processo de retificação se destaca por ser um dos processos mais usado, por sua precisão e bom acabamento. É essencial que se conheça bem este processo, já que o mesmo se encontra na última etapa da manufatura. Assim, problemas durante o processo de retificação comprometem-se a peça e pode-se perder o trabalho realizado em todas as etapas anteriores, acarretando em alto custo na produção e perda de matéria-prima. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um método de monitoramento das condições da superfície das peças, realizando um estudo comparativo da rugosidade e queima de peças retificadas com os sinais captados por um diafragma piezelétrico de baixo custo composto por Titanato Zirconato de Chumbo (PZT), bem como por um sensor de emissão acústica (EA). Os ensaios experimentais foram realizados em uma retificadora tangencial plana, onde um banco de ensaios foi desenvolvido empregando-se um rebolo de CBN com ligante resinoide em corpos de prova de aço VC131. Posteriormente, para caracterizar a superfície das peças, foi realizada a inspeção visual, medidas de rugosidade, medidas de micro dureza Vickers e uma análise metalográfica, para verificar a microestrutura de cada peça. Os sinais foram adquiridos através de um osciloscópio de alta taxa de amostragem e, posteriormente, tratados com filtros digitais. Na sequência, esses sinais, foram comparados com a queima e a rugosidade de cada peça em suas respectivas condições, através de técnicas de processamento de sinais. Notou-se que o aumento da rugosidade, bem como a ocorrência da queima da peça, possui um relacionamento com aumento do sinal RMS do PZT e da EA. Por meio deste estudo pôde ser verificada a eficácia do sinal emitido pelo diafragma piezelétrico de baixo custo, que apresentou uma correspondência satisfatória com a condição das peças do aço VC 131 após a retificação, de acordo com a análise espectral e o estudo do sinal nas devidas bandas de frequência utilizadas.

Palavras-chave: Monitoramento, Retificação, Diafragma Piezelétrico, Emissão Acústica.

ABSTRACT

The machining processes are of extreme importance for the manufacture of mechanical parts, the parts demand high dimensional and geometric precision and quality in its construction. Among the machining processes, the grinding process stands out as one of the most used processes, due to its precision and good finish. It is essential that this process is well known, since it is in the last stage of manufacture. Thus, problems during the grinding process compromise the part and can be lost the work carried out in all previous stages, resulting in high cost in production and loss of raw material. The objective of this work is to develop a method of monitoring the surface conditions of the parts by performing a comparative study of the roughness and burning of rectified parts with the signals captured by a low cost piezoelectric diaphragm composed of Lead Titanium Zirconate (LTZ), as well as an acoustic emission sensor (AE). The experimental tests were performed on a flat tangential grinding machine, where a test bench was developed using a CBN grinding wheel with resinoid binder in VC131 steel test bodies. Later, to characterize the surface of the pieces, visual inspection, roughness measurements, Vickers micro hardness measurements and a metallographic analysis were

performed to verify the microstructure of each piece. The signals were acquired through an oscilloscope of high sampling rate and later treated with digital filters. These signals were then compared to the firing and roughness of each part under their respective conditions, through signal processing techniques. It was noticed that the increase of the roughness, as well as the occurrence of the burning of the piece, has a relationship with increase of the RMS signal of the PZT and the EA. By means of this study, the efficiency of the signal emitted by the low cost piezoelectric diaphragm was verified, which presented a satisfactory correspondence with the condition of the parts of the steel VC 131 after the grinding, according to the spectral analysis and the study of the signal in proper frequency bands.

Keywords: Monitoring, Grinding, Piezoelectric Patch, Acoustic Emission.

1. INTRODUÇÃO

O grande desafio da indústria mundial é produzir equipamentos mais eficientes e para isso é necessário produzir peças sofisticadas com tolerâncias mecânicas mais apertadas e com acabamento superficial próximo a perfeição. Essa tendência mundial está sendo chamada de Indústria 4.0.

Diante dessa realidade, a retificação ocupa posição de destaque e é uma das mais importantes operações de usinagem empregada na produção de peças com dimensões mais exatas e de ótimo acabamento, pois sua utilização é tanto para remover sobre material em peças com geometrias especiais quanto para introduzir geometria desejada e propriedades superficiais, que geralmente são difíceis de ser obtidas por outros processos convencionais, com geometria definida, ou até mesmo por processos não convencionais de usinagem. A retificação, que já foi considerada somente como uma operação secundária de acabamento, tem sido amplamente empregada em várias etapas de fabricação [1].

Um método para melhorar o processo é a estimação das condições da superfície da peça, por meio do monitoramento dos sinais provenientes do processo de retificação.

Um dos principais parâmetros de saída para avaliar a competitividade do sistema de retificação como um todo, é a rugosidade da peça. Tal característica descreve a qualidade da superfície da peça, analisando fatores como a eficácia da lubrificação e refrigeração durante o processo, tolerâncias mínimas de corte, entre outras vertentes [2]. Assim monitorar o processo para prever e estimar a rugosidade é um ótimo método para analisar a precisão e a eficácia do processo de retificação plana tangencial.

A retificação requer de um alto nível de energia por unidade de volume de material removido. Grande parte dessa energia é dissipada na forma de calor, na região de retificação, ou seja, onde a peça interage com o meio abrasivo. Isso gera altas temperaturas que podem causar vários tipos de danos à peça, entre eles a queima[3]. De acordo com a aplicação da peça a ser produzida, o dano por queima limita a capacidade de produção do processo de retificação, portanto detectar sua ocorrência é de extrema importância. Sensores que conseguem aferir os fenômenos que ocorrem no processo de retificação são utilizados para monitorar tanto a queima quanto a rugosidade.

Um dos fenômenos que ocorrem durante o processo de retificação é a emissão acústica (EA). Pode-se afirmar que a EA é um tipo de energia elástica liberada devido ao deslocamento forçado de partículas gerando ondas que podem ser detectadas por sensores de emissão acústica [4].

Outro fenômeno que pode ser utilizado para monitorar o processo de retificação é o efeito piezométrico. Esse efeito pode ser definido como a capacidade que alguns cristais possuem de gerarem tensão elétrica por resposta a uma tensão mecânica. O termo (piezein) vem do grego e significa apertar. Os sensores piezométricos medem determinados parâmetros físicos que estão na forma de tensão mecânica ou elétrica. Eles vêm sendo utilizados em diversas áreas como, monitoramento de descarga parcial [5], monitoramento da integridade estrutural [6] e [7]. Porém a utilização desses sensores no monitoramento da retificação plana tangencial é uma área nova de pesquisa para que se possa reduzir o custo do monitoramento deste processo, e auxiliar na implantação da indústria 4.0 no país.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o funcionamento do diafragma piezométrico de baixo custo composto por Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) no monitoramento das condições da superfície das peças em um processo de retificação plana tangencial, por meio de um estudo comparativo com um sensor de (EA), correlacionando-os com a rugosidade, micro dureza e queima de peças retificadas com os respectivos sinais captados por um osciloscópio durante a retificação do aço VC131 com rebolo de CBN.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios experimentais foram realizados de acordo com a figura 1, em uma máquina retificadora tangencial plana, modelo 1055E da Sulmecânica, onde um banco de ensaios foi desenvolvido, empregando-se um rebolo de CBN com ligante resinoide, 14AI V180 B126 fabricante Nikkon, e nove peças de aço VC131 com dimensões de 150x48x7 mm, sendo respectivamente comprimento, largura e altura.

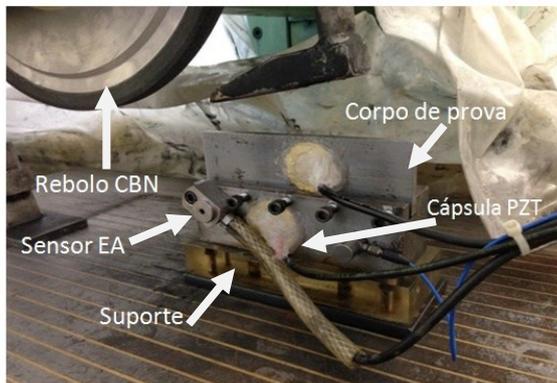


Figura 1:Banco de ensaio montado

O fluido de corte utilizado foi emulsão água-óleo na proporção de 39:1, sendo o óleo, do fabricante Quimatic, tipo ME-1, com uma vazão de 27,5 l/min e uma pressão de 0,2 kgf/cm² de forma abundante no contato da peça com o rebolo.

Durante os ensaios foram adotadas diferentes profundidades de corte (a) para o processo de retificação dos aços, de acordo com a tabela 1. A velocidade do rebolo (V_s) e das peças (V_w) foram mantidas constantes, respectivamente, 32,42 m/s e 0,124 m/s, sendo que o contato inicial. Na caracterização da superfície das peças foram realizadas a inspeção visual, rugosidade, análise metalográfica e micro dureza Vickers.

Tabela 1: Profundidades de corte

PEÇA	AÇO VC131
1 ^a	5 μ m
2 ^a	15 μ m
3 ^a	20 μ m
4 ^a	25 μ m
5 ^a	35 μ m
6 ^a	45 μ m
7 ^a	65 μ m
8 ^a	120 μ m
9 ^a	175 μ m

Conforme a figura 2, a coleta dos sinais puros foi realizada por meio de um sensor de EA da empresa Sensis, consistindo de um sensor fixo ao suporte da peça com módulo amplificador e processador de sinais do mesmo fabricante, modelo DM-42, juntamente com um diafragma piezoelétrico de baixo custo com um diâmetro de 34 mm.

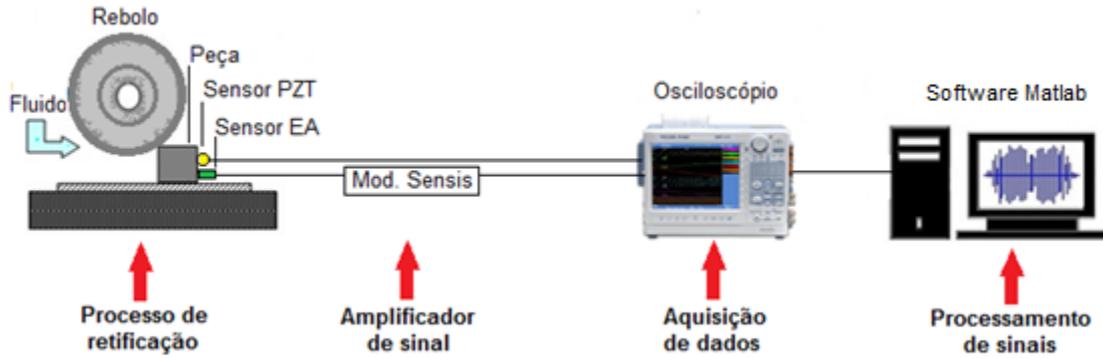


Figura 2: Aquisição de dados

A partir disso os sinais foram aqisitados por meio de um osciloscópio de alta amostragem, modelo DL850, da empresa Yokogawa, com frequência de amostragem de 2 MHz para ambos os sensores e posteriormente tratados com filtros digitais passa baixa Butterworth de 300 kHz e processados em software MATLAB, conforme Figura 3.

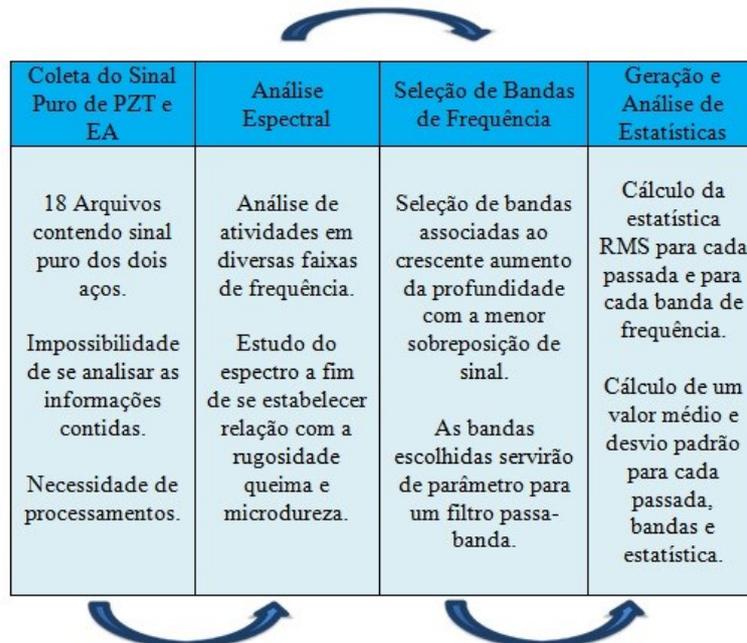


Figura 3: Processamentos no MATLAB

Para a caracterização da superfície das peças foi realizada a medição da rugosidade R_a utilizando um rugosímetro digital, modelo Surtronic 3+, fabricado pela Taylor Robson, com um cut-off de 0,8. A partir dos valores de rugosidade foram calculados a média e desvio padrão referentes a três medidas em cada ponto, a fim de se estudar o seu comportamento ao longo das profundidades de corte empregadas.

Para uma análise de possíveis danos na estrutura da peça foi realizada a análise metalográfica, bem como micro dureza Vickers de cada peça.

Para estes ensaios são necessários produzir pequenas amostras das peças na região da usinagem a ser analisada e embutir as mesmas posteriormente. Através de uma inspeção visual foi detectada a região de queima ao longo da peça, com esta região definida em 75% do início da peça, preparou-se uma amostra para cada uma das 9 peças. O corte foi realizado com uma máquina de corte metalográfica e o embutimento das amostras com baquelite com uma pressão de aproximadamente 100kgf/cm^2 , em uma temperatura de 160°C .

As amostras passaram por um processo de lixamento e polimento, a fim de garantir o desvio de planeza e bom acabamento. O processo de lixamento consistiu na utilização, respectivamente, das lixas d'água

com granulometria de 80, 120, 220, 320, 400, 500 e 600 em uma placa de vidro com jato de água. No polimento utilizou-se uma máquina de polimento metalográfico com suspensão de alumina de $1\mu\text{m}$ sobre um disco de feltro, a 600 RPM e água destilada com uma duração de três a quatro minutos.

Então foi realizado um ataque químico com Nital 2% durante aproximadamente 5 segundos até que a superfície da amostra ficasse opaca, e para realizar a neutralização do ataque foi realizado a limpeza em água abundante. Por meio de um microscópio óptico Olympus com uma ampliação de 500x foi obtida as imagens das microestruturas de cada uma das amostras.

Para a microdureza foi utilizado um microdurômetro Vickers Mitutoyo, Série HM 200 – Modelo HM 211, no qual foram realizadas 18 indentações por amostra com uma carga de 500g, em 3 colunas com uma distância entre elas de $200\mu\text{m}$ e cada coluna com 6 indentações com um espaço entre si de $100\mu\text{m}$, de acordo com a Figura 4. Por meio deste ensaio foi realizada uma análise e gerado um gráfico de microdureza.

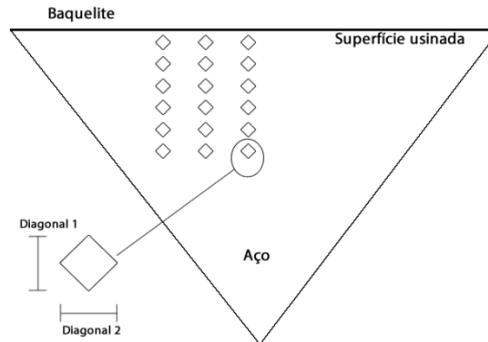


Figura 4: Ensaio de microdureza

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para as condições de retificação empregadas, a rugosidade R_a se manteve abaixo de $1\mu\text{m}$. Constatou-se que quando empregado o rebolo CBN num aço VC131 a rugosidade média das peças se mantém num valor abaixo de $1\mu\text{m}$. De acordo com DINIZ et al. [8], o valor padrão de rugosidade das peças retificadas deve ser abaixo de $1,6\mu\text{m}$. Sendo assim, conforme o aumento da profundidade de corte nota-se o crescimento da rugosidade devido ao aumento da remoção de material, de acordo com a figura 5.

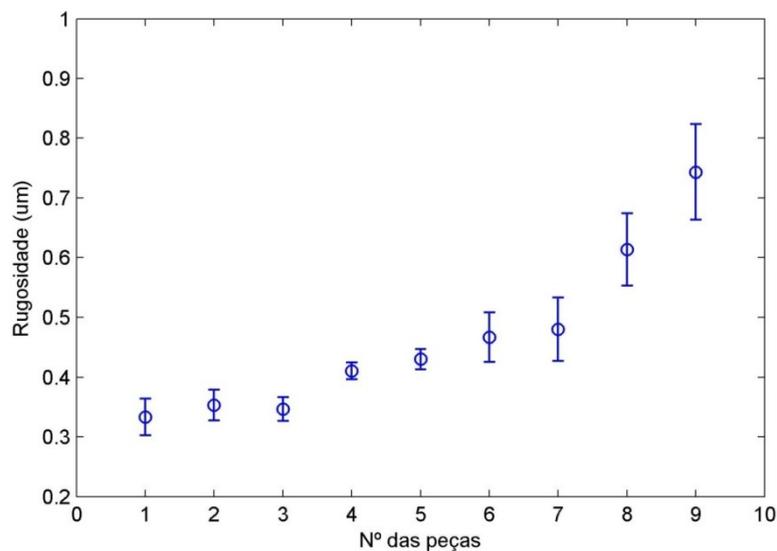


Figura 5: Valores Médios do desvio aritmético médio do perfil avaliado (R_a) nas nove condições de retificação do aço VC131..

A análise da queima dos 9 ensaios está descrita na tabela 2, onde "sem queima" significa retificação normal, e "queima leve" refere-se a peças com aumento do valor de rugosidade da superfície, mas abaixo do limite de $1\mu\text{m}$ e já apresentando pontos de queima. Peças com "queima severa" são peças com rugosidade

próximas ao especificado e com queima aparente ao longo da peça.

Tabela 2: Resultados da caracterização da superfície do VC 131.

	PROFUNDIDADE DE CORTE (μm)	CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE
1	5 μm	Sem queima
2	15 μm	Sem queima
3	20 μm	Sem queima
4	25 μm	Queima leve
5	35 μm	Queima leve
6	45 μm	Queima leve
7	65 μm	Queima severa
8	120 μm	Queima severa
9	175 μm	Queima severa

Observa-se na figura 6 que as peças de 1 à 3 não apresentaram queima visível e foi verificado que a rugosidade das peças se manteve abaixo de 0,4 μm . A partir da peça 4 começou a ocorrer queima leve com rugosidade ainda dentro da faixa mencionada. Os valores de rugosidade começaram a sair dessa faixa a partir da peça 6. Observa-se, no entanto, que as peças 4 a 6 já houve a ocorrência de queima, embora leve, com valores de rugosidade considerados relativamente baixos. Assim, a partir desta análise infere-se que a queima leve não leva necessariamente a um valor alto de rugosidade. Isto não ocorre para a queima severa, peças 7 à 9, pois os valores de rugosidades observados são significativamente mais altos.



Figura 6: Inspeção visual das superfícies das peças retificadas do VC 131.

O ensaio de microdureza Vickers mostra a variação da dureza da seção transversal à medida que se afasta da superfície retificada em direção ao centro do corpo de prova. Durante a retificação, podem ocorrer variações microestruturais que induzem alterações de dureza na peça em função da temperatura, condições atmosféricas e tempo de tratamento. A perda de dureza superficial pode estar relacionada com o revenimento da estrutura martensítica e com a difusão de átomos de carbono. Caso a temperatura da peça ultrapasse a temperatura de recristalização, ou o ponto de retempera, pode ocorrer a queima da peça e formação de uma camada branca de elevada dureza relativa à estrutura base [9].

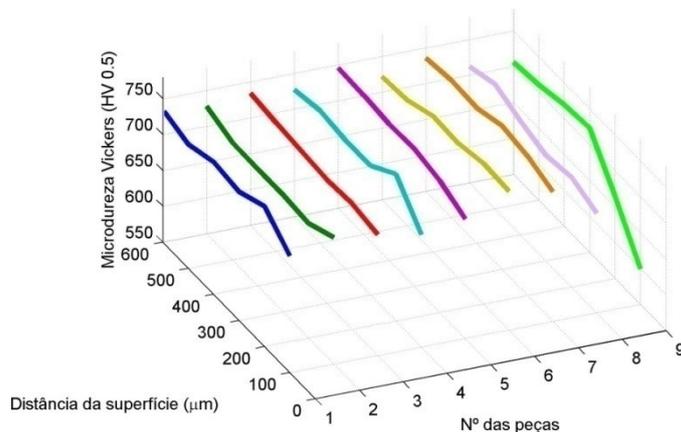


Figura 7: Microdureza Vickers aço VC 131

A Figura 7, mostra o comportamento das 9 condições avaliadas do aço VC 131 em uma distância da superfície de 100 à 600 µm. Pode ser visto que de acordo com que ocorre por conta da influência da temperatura na peça a tendência da microdureza é decair na superfície e ir aumentando até chegar ao centro da peça onde se manteve intacta. A peça de número 9 foi a que teve maior redução na dureza, sabendo que a dureza de trabalho desse aço é de 56-62 HRC aproximadamente 615-745 HV [10].

A análise metalográfica mostra possíveis danos térmicos provocados pela remoção de material durante o processo de retificação e possibilita também verificar a profundidade da camada afetada termicamente pelo processo de retificação. As figuras 8 a, b e c, mostram o que ocorreu em cada uma das condições das peças do aço VC 131.

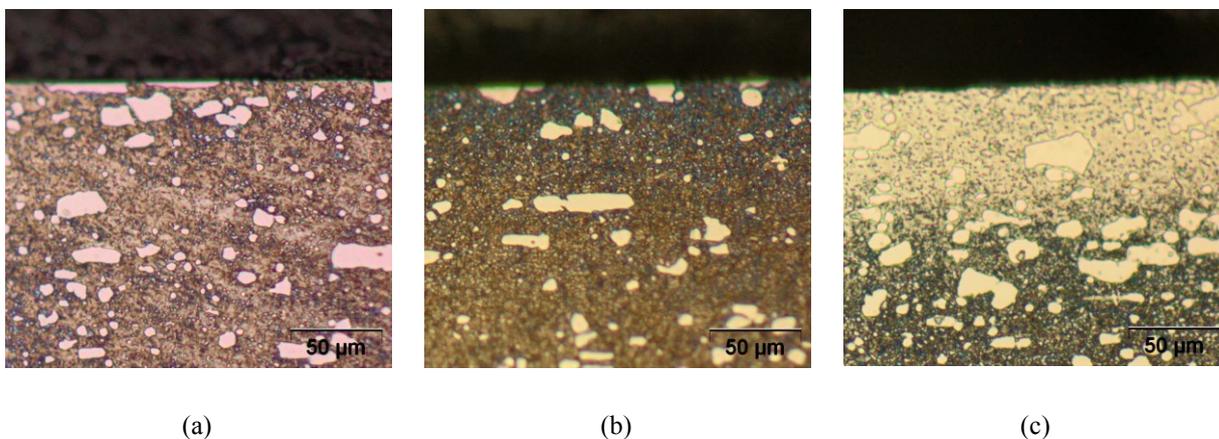


Figura 8: Metalografia VC131, (a) peça 1, (b) peça 4 e (c) peça 9.

Na figura 8a, pode ser visualizado a análise metalográfica da peça 1 que apresenta a estrutura da superfície do aço VC 131 retificada sem nenhuma alteração estrutural, considerando assim a peça 1 sem queima, com uma dureza média de 727 HV.

A peça 4 apresenta uma camada escura (superrevenimento) em sua superfície [11], de acordo com a figura 8b, o que explica o decaimento da dureza apresentado no tópico anterior.

A peça 9 que ocorreu visualmente queima severa sofreu influências da temperatura durante a usinagem, pois a mesma apresenta a camada branca em sua superfície indicando que houve retempera [11], sendo assim a micro dureza peça até 599 HV, como pode ser observado na figura 8c.

Esses tipos de danos térmicos dependendo da aplicação da peça comprometem de forma significativa a integridade superficial reduzindo a vida útil, podendo chegar a falha do componente durante a aplicação. Podendo ser uma camada superficial branca extremamente dura e frágil (martensita não revenida), seguida de uma região escura (revenimento excessivo localizado) com dureza inferior ao centro do material que não

sofreu alteração microestrutural.

Com a caracterização da superfície e a partir do estudo dos sinais do PZT de baixo custo e do sensor de EA, foi possível identificar bandas de frequência que tem suas amplitudes influenciadas pelas condições de retificação. Por meio do uso de filtros digitais butterworth associados ao parâmetro estatístico RMS, foi possível diferenciar as condições dos ensaios.

Pode ser visto nas figuras 9 e 10 que o sinal EA e PZT tem uma gama de frequência que vai de 0 à 300 kHz. A amplitude da EA é aproximada ao PZT, devido ao ajuste do ganho de sinal utilizando um módulo amplificador para o sinal de EA e não houve amplificação para o sinal de PZT.

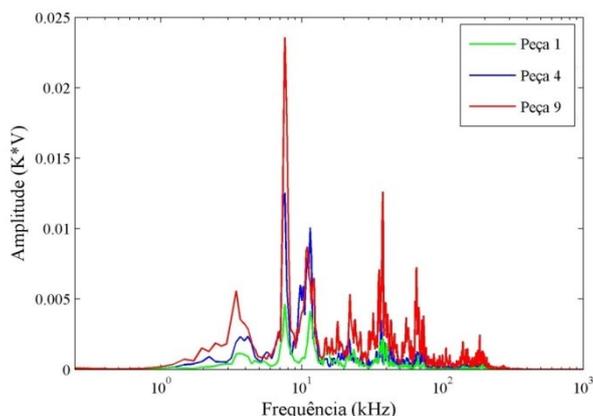


Figura 9: Espectro de frequência do sinal de EA para as condições 1, 4 e 9 de retificação do aço VC131 avaliadas.

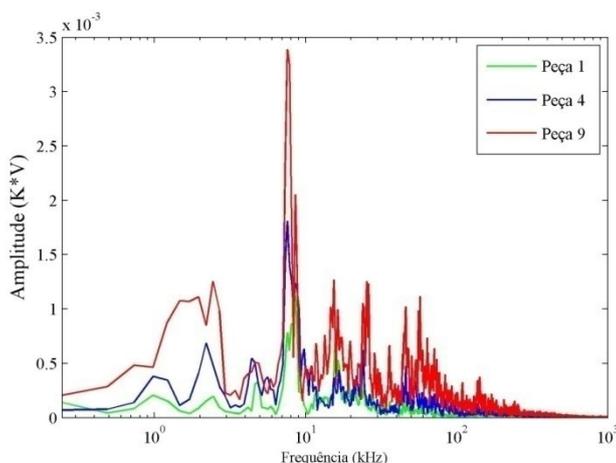


Figura 10: Espectro de frequência do sinal de PZT para as condições 1, 4 e 9 de retificação do aço VC131 avaliadas.

O critério utilizado na seleção da banda de frequência foi identificar as janelas de frequência em que as amplitudes do sinal para cada condição apresentassem sobreposição mínima. Para o aço VC 131 estas bandas de frequência, em kHz, do sinal EA foram: 115-121 e 146-154. As bandas de frequência selecionadas, em kHz, do sinal PZT foram: 87-95 e 152-156.

As figuras 11 e 12 mostram uma ampliação nas faixas de frequências para a EA e PZT, respectivamente, onde K é uma constante utilizada no processamento dos sinais. Pode-se perceber o comportamento dos sinais em cada uma das bandas, onde: o sinal na coloração verde está representando uma peça na condição de menor profundidade de retificação (condição mais branda dentre as avaliadas), o sinal na coloração azul está representando uma peça avaliada na condição intermediária e o sinal vermelho uma peça retificada com maior profundidade (condição severa). Nota-se ainda que nestas frequências as características dos sinais não se sobrepuseram garantindo que cada condição de usinagem tem amplitude de sinal diferente.

Vale ressaltar que existem outras bandas de frequência para sinal de EA: 194-202 kHz, 93-99 kHz e 56-65 kHz, e para sinal de PZT: 184-188 kHz, 48-58 kHz e 1-4kHz, que poderiam ser estudadas, bem como,

que podem ser consideradas para estudo posterior.

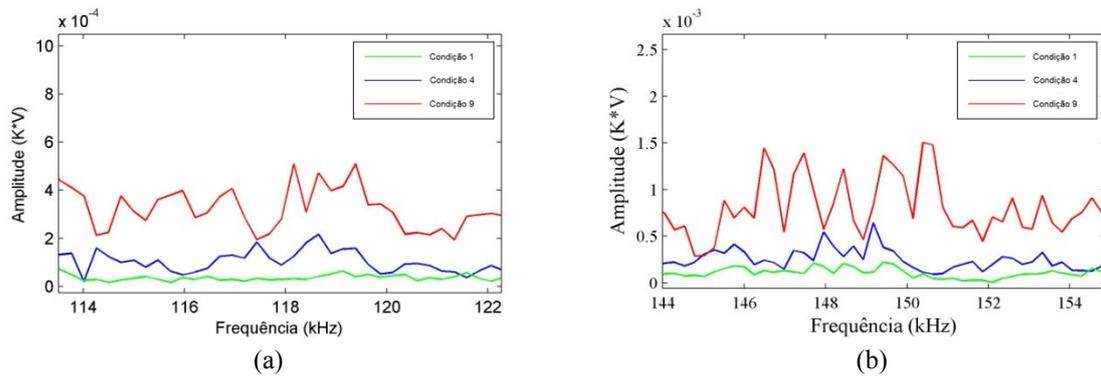


Figura 11:Ampliação na banda de frequência para EA (a) 115-121 kHz, (b) 146-154 kHz para as condições 1, 4 e 9 de retificação do aço VC131 avaliadas.

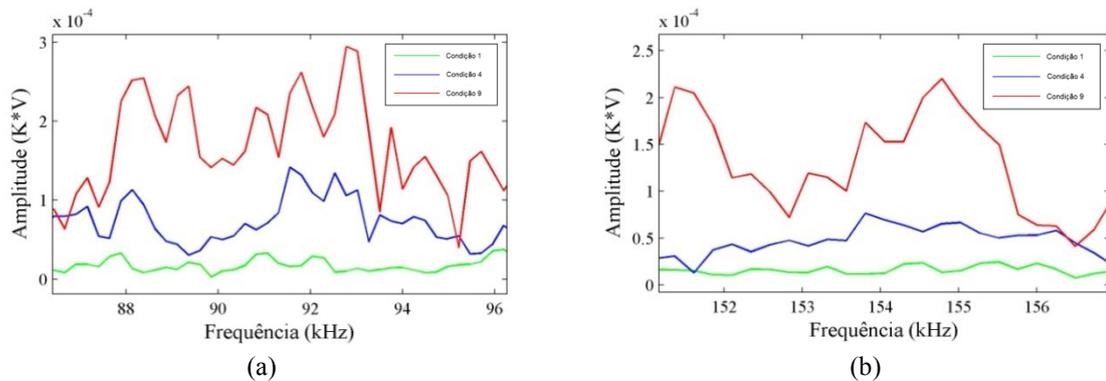


Figura 12:Ampliação na banda de frequência para PZT (a) 87-95 kHz, (b) 152-156 kHz para as condições 1, 4 e 9 de retificação do aço VC131 avaliadas.

Para analisar se as bandas escolhidas atendem aos requisitos foi realizado o parâmetro estatístico RMS para cada banda de frequência e comparados com o resultado para o sinal puro.

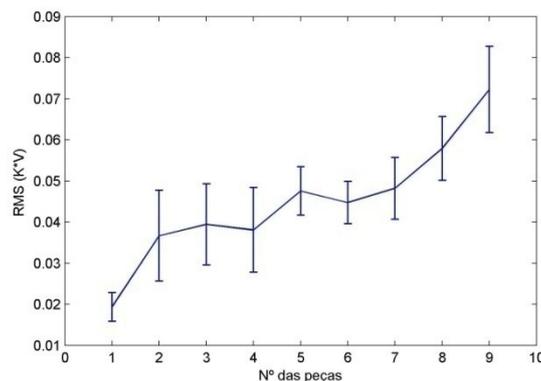


Figura 13:Valor médio RMS do sensor EA para as nove condições de retificação do aço VC131 avaliadas

O sinal do EA mostrado na figura 13 apresenta uma tendência de crescimento conforme se torna mais severa a condição de retificação, o que pode ser justificado pela maior liberação relativa de energia com o rompimento das ligações metálicas com a elevação da profundidade de corte.

Com a seleção das bandas de frequência que melhor representam estes fenômenos do processo de reti-

ificação torna-se um sinal com definições claras das condições da superfície da peça anteriormente estudada, representando de forma fiel através do crescimento da amplitude, mostrado na figura 14.

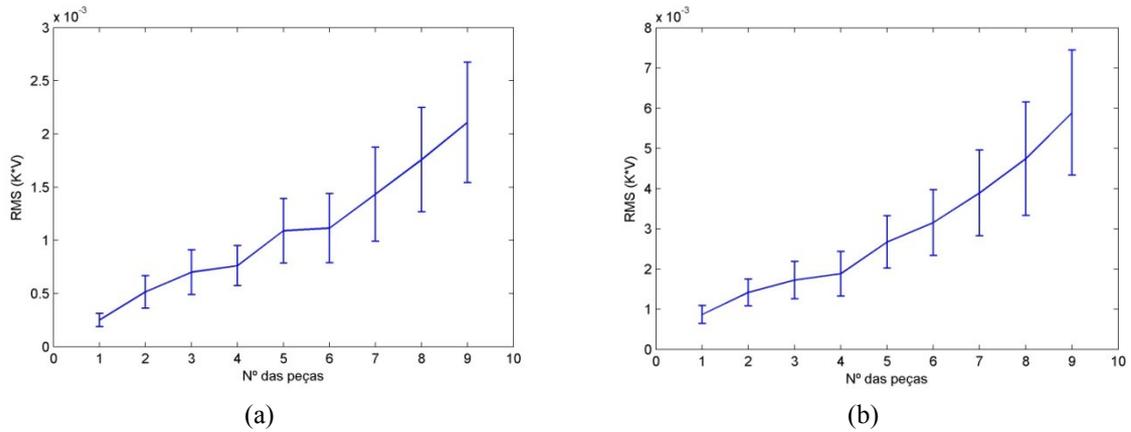


Figura 14: Valor médio RMS nas bandas selecionadas sensor EA (a) 115-121 kHz, (b) 146-154 kHz para as 9 condições de retificação avaliadas.

O sinal do PZT estudado para o monitoramento também apresenta na figura 15, uma tendência de crescimento na amplitude conforme se torna mais severa a retificação, porém sem a seleção das bandas de frequência o mesmo apresenta um decaimento de amplitude nas condições 4 e 6, para tornar-se um sinal que demonstre melhor essas condições necessita-se selecionar as bandas de acordo com a figura 16, que mostra um crescimento na amplitude e reduz o decaimento das condições 4 e 6 evidenciando as condições antes analisadas das superfícies.

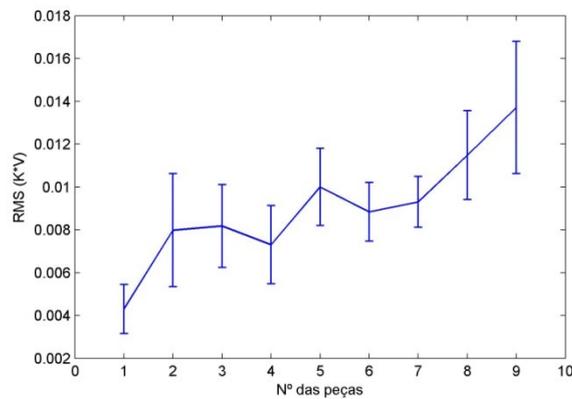


Figura 15: Valor médio RMS do sensor PZT para as 9 condições de retificação avaliadas.

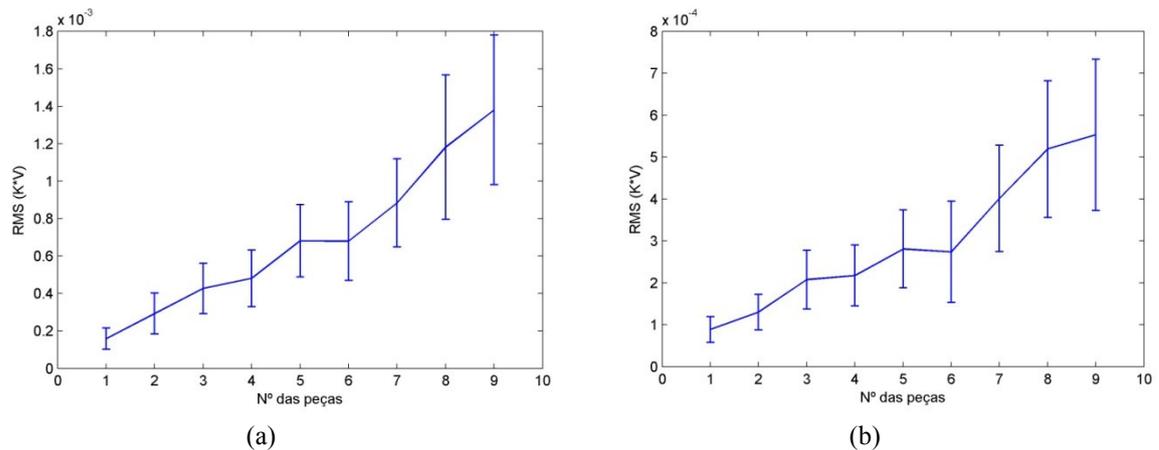


Figura 16: Valor médio RMS nas bandas selecionadas sensor PZT (a) 87-95 kHz, (b) 152-156 kHz para as 9 condições de retificação avaliadas.

De acordo com a estatística RMS, o sinal do diafragma piezelétrico é correspondente com as condições das peças de aço VC131 retificadas, reproduzindo um comportamento semelhante ao sensor de EA. Os dois sinais conseguem captar as vibrações e oscilações que ocorrem durante o processo de forma fiel, podendo ser aplicados neste tipo de monitoramento.

4. CONCLUSÕES

Em relação aos métodos usados e os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

O sinal do diafragma piezelétrico de baixo custo (PZT) apresentou uma correspondência com as condições das peças do aço VC 131 após a retificação, de acordo com a análise espectral e o estudo do sinal nas devidas bandas de frequência utilizadas.

Com o estudo do sensor de emissão acústica, pode-se comprovar ainda mais os resultados obtidos para o PZT, pois os mesmos se assemelharam a este sensor que já é amplamente utilizado nos monitoramentos de retificação.

O crescimento do valor do desvio aritmético médio do perfil avaliado Ra é praticamente proporcional ao aumento da severidade do processo de retificação e aos sinais de PZT e EA estudados na estatística RMS.

Estas análises foram muito importantes para qualificar danos superficiais e micro estruturais nas peças em função das condições de corte adotadas, observados pela análise de micro dureza Vickers e análise metalográfica e apoiados pelo monitoramento dos ensaios, por meio das variáveis de saída: rugosidade, análise visual e sinal de PZT e EA.

Esta qualificação é extremamente necessária, porque a qualidade superficial das peças retificadas será monitorada com um menor custo para a indústria, sabendo que cada diafragma pode ser encontrado em sites de compra a um valor de cinquenta centavos de real em média. Com isso, os danos na superfície das peças devem diminuir e, conseqüentemente a sua vida útil aumentar.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] SHAW, M. C., "Principles of abrasives processing", *Oxford Science on Advanced Manufacturing*, pp.574, New York, USA, 1996.
- [2] HECKER, R.L. & LIANG, S. Y., "Predictive modeling of surface roughness in grinding", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.43, n. 8, pp. 755–761, 2003.
- [3] MALKIN, S., & GUO, C., "Thermal Analysis of Grinding", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 56, n. 1. Pp. 760–782, Feb. 2007.
- [4] LIU, Q., CHEN, X., & GINDY, N., "Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.46, pp. 284–292, 2006.

- [5] DANOUJ, B., TAHAN, S. A., & DAVIAD, E., "Using a new generation of piezoelectric sensors for partial discharge detection", *Measurement*, v. 46, n.1. pp. 660-666, Jan. 2013.
- [6] NA, S., LEE, H. K., "Steel wire electromechanical impedance method using a piezoelectric material for composite structures with complex surfaces", *Composite Structures*, v. 98, pp. 79–84, 2013.
- [7] ALMEIDA, V. A. D., BAPTISTA, F. G., AGUIAR, P. R., "Piezoelectric Transducers Assessed by the Pencil Lead Break for Impedance-Based Structural Health Monitoring", *IEEE Sensors Journal*, v.15, n. 2. pp. 693–702, Feb. 2015.
- [8] DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., *Tecnologia da usinagem dos Materiais*, 4ª Edição, Campinas, SP, Brasil, Artiber Editora Ltda, 2003.
- [9] MALKIN, S., *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*, 2ª Edição, New York, Industrial Press Inc, 2008.
- [10] VILLARES METALS, <http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/AcosFerramenta/Trabalho-a-frio/VC131>. Acessado em maio de 2016.
- [11] INA, *Queima de Retificação – Pré-condições para evitar a queima de retificação*, 1ª Edição, Abr. 2009.