

INFLUÊNCIA DA PENETRAÇÃO DE TRABALHO E VELOCIDADE DA PEÇA NO ACABAMENTO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR APÓS A RETIFICAÇÃO COM REBOLO DE SiC

Lurian Souza Vieira da Silva, Universidade Federal de Uberlândia, lurianvieira@gmail.com

Rosemar Batista da Silva, Universidade Federal de Uberlândia, rosemar.silva@ufu.br

Mariana Landim Silveira Lima, Universidade Federal de Uberlândia, mariana_lan7@hotmail.com

Déborah de Oliveira, Universidade Federal de Uberlândia, deborahrpoliveira@gmail.com

Resumo: A retificação é um processo de usinagem que remove material por meio da ação de grãos abrasivos de geometria não definida e de pequenas dimensões que constituem o rebolo. Este processo visa conferir à peça elevada precisão dimensional e geométrica e, por isso, se destaca dentre os processos de usinagem de metais. Um material que tem exigido o emprego da retificação é o ferro fundido, principalmente, devido à boa combinação entre resistência mecânica e um menor custo de produção, em relação aos aços. Os ferros fundidos têm sido empregados na fabricação de componentes para motores de combustão interna tais como eixos virabrequim, de comando de válvula e blocos de motores. Contudo ainda são poucas as informações na literatura específica sobre a usinabilidade destes materiais quanto à operação de retificação. E neste contexto, visando contribuir para a geração de informações sobre a retificação destes materiais, nesta pesquisa foram realizados ensaios de retificação plana do ferro fundido vermicular com rebolo de carbeto de silício em diferentes condições de corte. Os parâmetros de entrada empregados foram: a penetração de trabalho (15 e 30 μm) e velocidade longitudinal da peça (5 e 10 m/min). As variáveis de saída foram os parâmetros de rugosidade R_a e R_z e também a textura da superfície, que foi analisada por meio de imagens obtidas através do Microscópio Eletrônico de Varredura. Os resultados mostraram que o parâmetro R_a foi mais sensível à variação da velocidade da peça que da penetração de trabalho e o melhor acabamento foi proporcionado ao usinar com a menor velocidade da peça.

Palavras-chave: retificação, ferro fundido vermicular, carbeto de silício, penetração de trabalho, velocidade da peça.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de retificação representam grande importância para indústria metal mecânica, pois conferem às peças usinadas tolerâncias dimensionais e geométricas mais apertadas que aquelas proporcionadas pelos processos convencionais com ferramenta de geometria definida. De acordo com Malkin e Guo (2008) e Marinescu et al. (2007) o processo de retificação pode ser definido como um processo de usinagem em que uma ferramenta abrasiva gira em alta rotação, que configura em geral uma velocidade de corte superior a 30 m/s, que promove a remoção de pequenas quantidades de material da peça. A ferramenta abrasiva é chamada de rebolo a qual é composta por grãos cerâmicos com arestas afiadas e orientação irregular, ligante e poros.

Além da garantia de tolerâncias geométricas e dimensionais mais apertadas, é preciso garantir que os parâmetros que regem a integridade superficial e subsuperficial da peça sejam preservados após a usinagem, o que não é uma tarefa fácil. De acordo com Malkin e Guo (2008), a qualidade superficial de peças usinadas consiste de dois aspectos: integridade superficial, relacionada a alterações mecânica e textura superficial, relacionada a topografia e consequentemente rugosidade.

Desta forma, a preservação da integridade da superfície das peças dependerá da correta escolha das condições de retificação tais como: tipo de rebolo, velocidade de corte, penetração de trabalho, velocidade da peça, fluido de corte e técnica de aplicação, dentre outros. Sabe-se que o processo de retificação requer muita energia por unidade de volume removido, e grande parte desta energia é convertida em calor na região de corte, devido ao atrito, elevando a temperatura da peça e do rebolo. O que contribuiu para a geração de calor durante este processo são as características dos abrasivos convencionais, por exemplo são pobres condutores de calor, como também as pequenas sessões de cavacos devido às pequenas penetrações de trabalho empregadas. Com isso, estima-se que 85% do calor total gerado seja transferido para peça. Como decorrência do calor, a temperatura irá se elevar na região de corte e, dependendo do valor, irá provocar vários tipos de danos térmicos nas peças, como: queima da superfície, mudança de fase, tensões residuais, trincas na superfície ou sub-superfície (Mandal et al., 2014 e Malkin e Guo, 2008).

E dentre os principais danos, destaca-se a formação de trincas, em função da variação térmica durante a retificação. Em geral, a presença delas reduz o limite de resistência à fadiga do material e aumenta a possibilidade da superfície ser atacada por processos corrosivos, como também de ocorrência de falhas dos componentes em serviço (Silva et al., 2000).

Um material de engenharia que está há pouco tempo no mercado é o ferro fundido vermicular, portanto uma classe de material ainda com poucas informações sobre a sua usinabilidade na literatura específica quando se diz respeito à retificação. O ferro fundido é definido com uma liga ternária contendo, ferro em sua maior parte, silício e teor de carbono

acima de 2,11% (Chiaverini, 2002). Os ferros fundidos são classificados de acordo com a composição química e microestrutura, mais especificamente quanto à existência e a forma da grafita, em ferros fundidos cinzentos, brancos, maleáveis, nodulares, mesclados e de grafita compactada, o objeto de estudo é o ferro fundido de grafita compacta (vermicular): caracterizado por apresentar a grafita em forma de “escamas ou vermiculos”, ou seja, em forma de plaquetas ou estrias. Ele é considerado um material intermediário entre os ferros fundido cinzento e o nodular, possui a fundibilidade do ferro fundido cinzento, com melhor resistência mecânica e alguma ductilidade. Mocellin et al. (2004) relataram que a grafita neste material se apresenta mais arredondada e mais grosseira, de modo que a sua forma e distribuição conferem ao vermicular um ganho substancial de propriedades mecânicas destacando-se as resistências mecânica e à fadiga, com uma perda pouco significativa de condutividade térmica e de amortecimento.

Esta classe de ferro fundido abrange uma grande faixa de aplicações, e as principais são: bloco de motores a diesel, alojamentos de caixas de engrenagens, alojamentos para turbo alimentadores, suportes de rolamentos, rodas dentadas para correntes articuladas, engrenagens excêntricas, moldes para lingotes, coletores de descarga de motores e discos de freio de automóveis em geral (Machado et al., 2009).

Neste sentido, este trabalho foi realizado em processo de retificação de ferro fundido vermicular com rebolo de carbetto de silício em várias condições de corte. Espera-se que os resultados obtidos possam servir de referência para os usuários a retificação desta classe de ferros fundidos.

2. METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados a metodologia adotada para desenvolvimento deste trabalho, detalhes dos equipamentos, condições de corte, peças e rebolos. Os ensaios de retificação foram realizados em uma retificadora plana tangencial, modelo P36, 2400 rpm, potência igual 3HP e com resolução no eixo Z de 5 μm , do fabricante Mello. A ferramenta de corte empregada foi um rebolo abrasivo convencional de carbetto de silício (SiC), especificação 39C100KVK, com dimensões de 254 mm x 25 mm x 76 mm, do fabricante Saint-Gobain Abrasivos da América do Sul. As peças utilizadas foram de ferro fundido vermicular FV 450 (229 HB) em forma de barra retangular com 49 mm de comprimento x 18 mm de altura x 19 mm largura.

Os parâmetros de corte adotados foram: duas penetrações de trabalho (15 e 30 μm), duas velocidades da peça, (5 e 10 m/min) e velocidade de corte igual a 32 m/s (que foi mantida constante em todos os ensaios). O critério de parada adotado nos ensaios foi a retirada de material da peça até atingir uma profundidade total de 60 μm na altura, configurando portanto um volume total de material removido igual a 55,9 mm³. Para isso, foram realizados quatro passes com o ae de 15 μm e dois passes para ae de 30 μm .

Todos os ensaios foram realizados com fluido de corte. Para isto, utilizou-se um fluido de corte semissintético de base vegetal (Vasco 7000), na proporção de 1:19 (óleo:água) e vazão de 540 L/h que foi aplicado à área de usinagem pelo método convencional (abundância) em posição tangente ao rebolo.

Os parâmetros de saída foram a rugosidade e textura da superfície da peça. A rugosidade foi avaliada em termos dos parâmetros de amplitude rugosidade média (Ra) e rugosidade total (Rz) que foram medidos em um rugosímetro portátil modelo SJ201P, do fabricante Mitutoyo, com resolução de 0,01 μm , comprimento de avaliação de 4,0 mm e comprimento de onda do filtro (cut-off) foi de 0,8 mm. Este equipamento possui a faixa nominal igual à 360 μm (-200 μm até +160 μm). As medições foram efetuadas a temperatura ambiente controlada de (20 $\pm$ 1) °C, conforme recomendado pela NBR NM ISO- 1 (ABNT, 1997). A fim de obter resultados rastreáveis, o sistema de medição foi previamente calibrado conforme recomendado pela Norma ISO IEC 17025 (ABNT, 2005). Os valores de rugosidade são resultados da média aritmética de quatro medições realizadas em pontos diferentes da peça equidistantes de 10 mm, na direção perpendicular ao avanço longitudinal da peça.

Para obtenção das imagens das superfícies retificadas utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), TM3000, localizado no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Antes da observação todas as amostras foram limpas com acetona em um equipamento conhecido como limpador por vibração ultrassônica, Cole-parmer 8848. Em seguida elas passaram por secagem apropriada. As superfícies das amostras foram observadas em sua totalidade, na face retificada, para a verificação da ocorrência de trincas e microtrincas, além da comparação entre superfícies. Todas as imagens foram obtidas utilizando uma ampliação de 500 X.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados de rugosidade e as imagens obtidas via MEV das superfícies obtidas após a retificação do ferro fundido vermicular com rebolo de carbetto de silício em diferentes condições de corte.

3.1. Rugosidade

Os valores de rugosidade para os parâmetros Ra e Rz das amostras de ferro fundido vermicular são apresentados nas Figs. (1) e (2), respectivamente. Da Fig. (1) pode-se perceber que os valores de Ra mantiveram-se abaixo de 0,40 μm , valores inferiores ao limite máximo para operações de semi-acabamento de 0,63 μm que é geralmente relatado na literatura (Kalpakjian e Schmid, 2009).

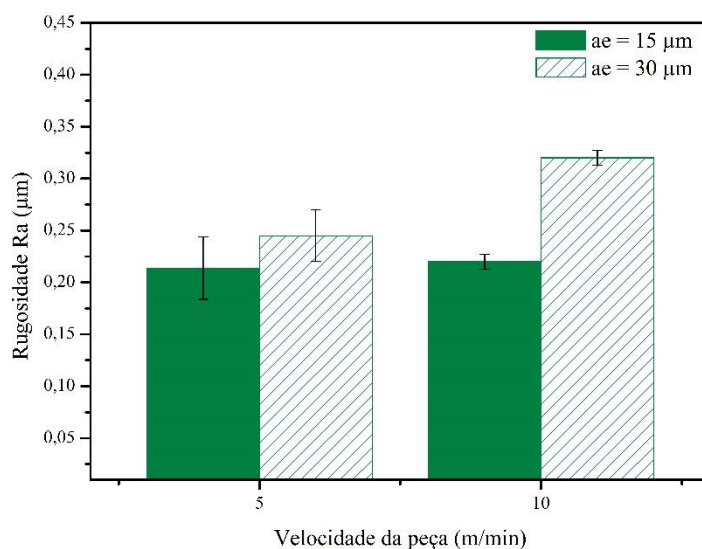


Figura 1: Rugosidade Ra para as amostras de ferro fundido vermicular em função da velocidade da peça.

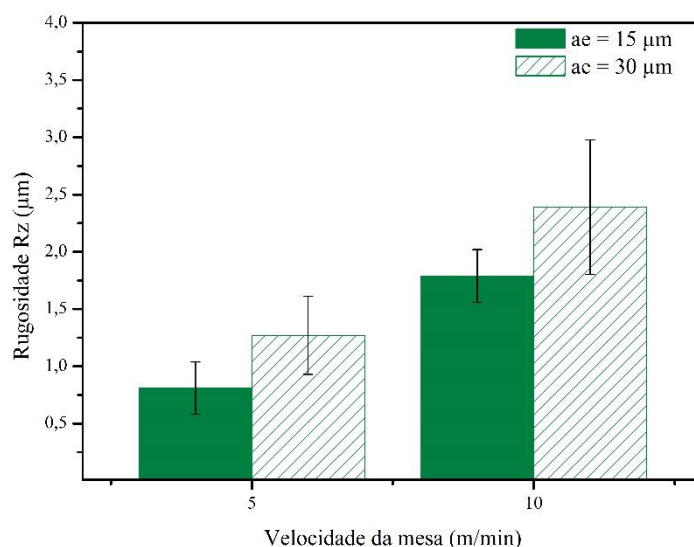


Figura 2: Rugosidade Rz para as amostras de ferro fundido vermicular em função da velocidade da peça.

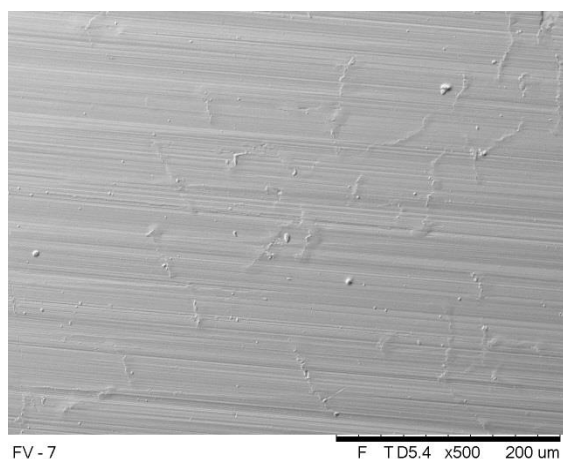
Das Figuras (1) e (2) nota-se que os comportamentos para o parâmetro Ra e Rz em função dos parâmetros de corte testados foram diferentes. De maneira geral, a rugosidade Ra foi mais sensível à velocidade da peça que em relação a penetração de trabalho, pois não se pode afirmar que houve variação no valor de Ra ao aumentar a penetração de trabalho de 15 μm para 30 μm, pelo elevado valor de desvio padrão. Já para o parâmetro Rz (Fig. 2) houve influência tanto da penetração de trabalho quanto da velocidade da peça. Conforme aumenta-se a penetração de trabalho, o parâmetro Rz é também aumentado (Marinescu et al, 2007). Bianchi et al. (1997) apresentaram a seguinte explicação para esta relação: ao empregar uma menor penetração do rebolo na peça, um pequeno número de grãos atuam para remover material em um menor tempo de contato. À medida que se aumenta a penetração de trabalho, aumenta-se também o número de grãos em contato com a peça, o comprimento de contato entre rebolo e peça e a área de contato. Com isso, haverá acréscimo nos esforços de corte da ferramenta sobre a peça, deformação plástica do material de peça, geração de calor e elevação da temperatura de corte, o que contribui para a deterioração da superfície sendo usinada. Além disso, ao empregar maiores valores de penetração de trabalho, tem-se um aumento nas dimensões dos cavacos, que com a progressão da usinagem, podem se agrupar e levar ao empastamento do rebolo. Assim, o cavaco que se aloja no rebolo influencia negativamente na sua eficiência durante a retificação, aumentando os esforços na região de contato entre a ferramenta e a peça e, conseqüentemente, comprometendo a superfície retificada. Comportamento semelhante foi observado por

Damasceno (2010), em seu trabalho de retificação do aço ABNT 4340 em diferentes condições de corte, em que o parâmetro R_a aumentou com a penetração de trabalho.

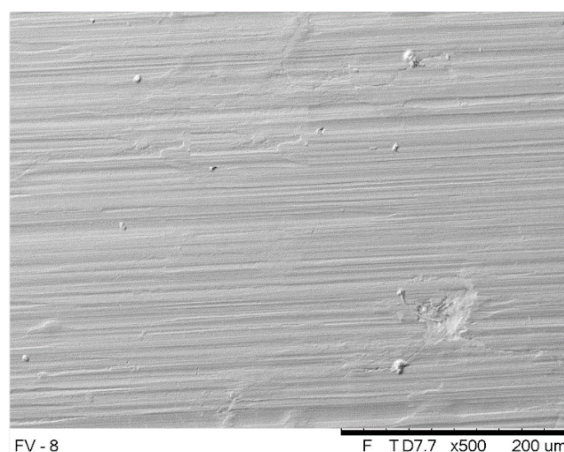
Das Figuras (1) e (2) pode-se observar ainda que o aumento da velocidade da peça também influencia no acabamento e a influência deste parâmetro foi mais acentuada ao empregar condições mais severas de retificação, $a_e = 30 \mu\text{m}$. É importante destacar que tanto a velocidade da peça quanto a penetração de trabalho determinam o parâmetro de retificação conhecido como espessura de corte equivalente em uma relação diretamente proporcional. Desta forma, o aumento em uma destas grandezas ou em ambas eleva a espessura de corte equivalente e em geral proporcionando superfícies com maior valor de rugosidade. De acordo com Marinescu et al (2007), o aumento na velocidade da peça implica em uma maior vibração da máquina ferramenta que, por consequência, eleva os valores de rugosidade obtidos ao fim do processo de retificação.

3.2. Análise da superfície retificada via MEV

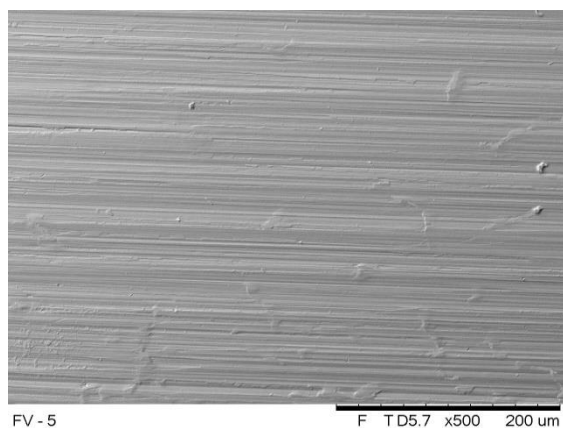
Na Figura (3) são mostradas as imagens das superfícies das amostras de ferro fundido vermicular FV 450, retificadas com rebolo SiC. Através das imagens obtidas via MEV, com ampliação de 500 vezes, pode-se notar que as marcas de avanço são visíveis e que existe certa regularidade das marcas (trilhas) deixadas pelos grãos abrasivos. Contudo, em alguns casos as trilhas estão interrompidas, indicando a falta de eficiência dos abrasivos para retirarem material durante a sua passagem por sobre a superfície da peça. Evidências de camadas superpostas de material da peça são observadas nas superfícies das amostras retificadas em condições mais severas de usinagem (Figs. 3 (b) e (d)); o que pode ser atribuído às propriedades desta classe de ferro fundido, principalmente à sua ductilidade mais elevada em relação ao ferro fundido cinzento. Materiais com características dúcteis em geral favorecem a formação de fluxo lateral de material provocado pela passagem dos grãos e que pode permanecer na peça durante a usinagem. Ele será mais intenso conforme mais severas forem as condições de usinagem.



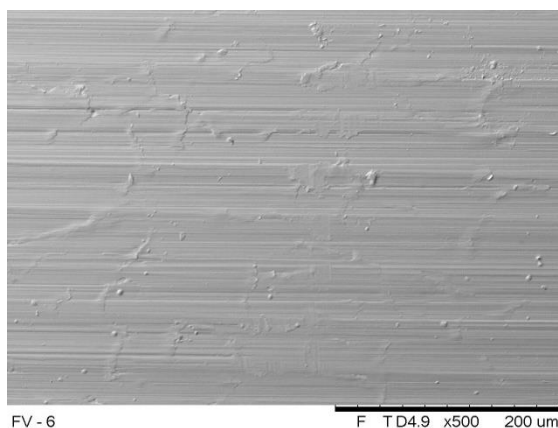
(a) $a_e = 15 \mu\text{m}$ e $v_w = 5 \text{ m/min}$



(b) $a_e = 30 \mu\text{m}$ e $v_w = 5 \text{ m/min}$



(c) $a_e = 15 \mu\text{m}$ e $v_w = 10 \text{ m/min}$



(d) $a_e = 30 \mu\text{m}$ e $v_w = 10 \text{ m/min}$.

Figura 3: Imagens das superfícies do ferro fundido vermicular FV 450 obtidas via MEV após retificação nas várias condições de corte, (a) $a_e = 15 \mu\text{m}$ e $v_w = 5 \text{ m/min}$, (b) $a_e = 30 \mu\text{m}$ e $v_w = 5 \text{ m/min}$, (c) $a_e = 15 \mu\text{m}$ e $v_w = 10 \text{ m/min}$ e (d) $a_e = 30 \mu\text{m}$ e $v_w = 10 \text{ m/min}$.

4. CONCLUSÕES

Após os ensaios e análises pôde-se concluir que os parâmetros de rugosidade (R_a e R_z) sofreram influência da velocidade da peça, em uma relação direta, o parâmetro R_a não sofreu influência da penetração de trabalho. Além disso, os valores de R_a mantiveram-se abaixo de $0,40\text{ }\mu\text{m}$ para todas as condições testadas, valores inferiores ao limite máximo para operações de semi-acabamento. Por fim, para o maior valor de penetração de trabalho $a_e = 30\text{ }\mu\text{m}$ foi possível perceber a presença de material aderido na superfície retificada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a CAPES-PROEX, CNPq e FAPEMIG, à Faculdade de Engenharia Mecânica, ao Programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica e organizadores do POSMEC 2016, como também aos integrantes do grupo LEPU pelo apoio científico e tecnológico. Os autores agradecem também a Tupy, Saint-Gobain Abrasivos da América do Sul e Blaser Swisslube pela doação, respectivamente, dos ferros fundidos, reboło e fluido de corte utilizados.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO/IEC 17025: Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaios e calibração. Rio de Janeiro, 2005.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR NM-ISO 1: Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento. Rio de Janeiro, 1997. 2p.
- Bianchi, E.C., Valarell, I.D., Fernandes, O.C., Mogami, O., Silva JR, C.E. e Aguiar, P.R. “Análise do comportamento de rebolos convencionais na retificação de aços frágeis e dúcteis”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol. 19, 1997, pp 410-425.
- Chiaverini, V. “Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento”. Ed. McGraw-Hill Ltda, São Paulo, Brasil, Vol. 3., 1986, 388 p.
- Damasceno, R.F. “Análise da influência da profundidade de corte e de diferentes métodos de lubri-refrigeração na retificação plana de aço ABNT 4340”. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Bauru, 2010.
- Kalpakjian, S. e Schmid S.R., “Manufacturing Processes for Engineering Materials”. Ed. Pearson Education, 2009, 1040 p.
- Marinescu, I.D., Hitchiner, M., Uhlmann, E., Rowe, W.B. e Inasaki, I. “Handbook of machining with grinding wheels”. Ed. CRC Press, New York, 2007, 596 p.
- Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Silva, M. B.; Coelho, R. T. “Teoria da usinagem dos materiais”. Ed. Blucher, São Paulo, Brasil, 2009, 371 p.
- Malkin, S., Guo. C. “Grinding Technology: Theory and Applications of Machining With Abrasives”. Ed. Industrial Press, New York, 2ª ed., 2008, 372 p.
- Mandal, B., Sarkar, A., Biswas, D., Das, S., Banerjee, S. “An effective grinding fluid delivery technique to improve grindability of inconel-600”. 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December, IIT Guwahati, Assam, Índia, 2014.
- Mocellin, F.; Melleras, E.; Boehs, L.; Guesser, W. L. “Study of the machinability of compacted graphite iron for drilling process”. I Brazilian Manufacturing Congress, Vol. XXVI, nº 1, Uberlândia, Brasil, 2004, pp. 22-27.
- Silva, E. J.; Bianchi, E. C.; Aguiar, P. R.” Danos térmicos na retificação decorrentes do par fluido-ferramenta adotado”. I Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, Natal, Brasil, 2000.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.