

DETERMINAÇÃO DE COMPONENTES DE FORÇA ATUANTE EM GRÃO ABRASIVO VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Luciano Antônio Fernandes, Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM,
luciano.fernandes@mecanica.uftm.edu.br

Rosemar Batista da Silva, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, rsilva@mecanica.ufu.br

Antônio Marcos Gonçalves de Lima, Universidade Federal de Uberlândia – UFU amglima@mecanica.ufu.br

Gustavo Fernandes Araújo, Universidade Federal de Uberlândia – UFU gustavofernandesmec@mec.ufu.br

Resumo. A magnitude das componentes da força envolvidas no processo de retificação dependente das interações tribológicas entre grão abrasivo e peça. E por ser um processo oneroso e demorado, pois a taxa de remoção é muito pequena quando comparada com outros processos como o fresamento, por exemplo, é importante investir em técnicas que não necessitem de ensaios experimentais, de preferência, e que sejam confiáveis. E uma alternativa é utilizar os métodos numéricos computacionais. Neste sentido, este trabalho visou determinar as componentes das forças atuante em um único grão abrasivo na superfície do aço ABNT N2711M por meio de ensaios de simulação computacional baseada na técnica dos elementos finitos adotando o modelo de Johnson-Cook. Os parâmetros de entrada para o processo de retificação frontal foram: velocidade de passagem do grão velocidade de corte igual a 15 m/s e profundidade de corte igual a 0,015 mm. Os resultados da simulação foram comparados com aqueles obtidos experimentalmente em um centro de usinagem CNC, em que se empregou uma ponta montada com mais de um abrasivo atuante. Os resultados mostraram que os valores obtidos por meio da simulação são proporcionais aos obtidos pelos ensaios experimentais e comprovam que as magnitudes das componentes de força são típicas do processo de retificação.

Palavras chave: Simulação, Retificação frontal, Grão abrasivo, Força, Método de Elementos Finitos.

1. INTRODUÇÃO

A retificação frontal ou de face possui várias aplicações na indústria metal-mecânica, dentre elas para melhoria do acabamento e redução dos desvios dimensionais de faces de roletes e rolos de rolamentos em geral como também para a afiação de ferramentas de geometria. É ainda um processo pouco abordado quando comparado a retificação plana tangencial. Alguns trabalhos de destaque são os de Lal (1968) discorre sobre o comportamento das forças e suas magnitudes, Srihari e Lal, (1994) e Perveen, *et al.* (2014) descrevem o mecanismo de formação do cavaco e definem a força por grão respectivamente para abrasivo convencional para super abrasivo.

A maioria dos modelos matemáticos que foram desenvolvidos para prever os esforços de corte na retificação baseia-se nas interações dos grãos do rebolo e a peça (Malkin, *et al.*, 2008). Estes modelos são simplificações para obtenção de parâmetros de saída, como a força de corte, para viabilizar adquirir os resultados sem que haja necessidade de realizar ensaios experimentais. Outros modelos abordam o comportamento dos materiais quando submetidos a elevadas taxas de deformação, ou seja, da lei constitutiva do material. A fim de contribuir para as pesquisas na área de predição forças de retificação, o objetivo deste trabalho foi determinar as componentes das forças atuantes em um único grão abrasivo (com geometria semelhante ao grão de um abrasivo de uma ponta montada) ao passar pela superfície de uma amostra de aço ABNT N2711M. Ensaios experimentais de retificação de monitoramento de força foram realizados e os resultados comparados com aqueles obtidos via simulação.

2. METODOLOGIA

A seguir será apresentada a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho, incluindo os equipamentos, materiais, instrumentos de medição e parâmetros de corte.

2.1. Ensaio experimental

O processo de retificação plana frontal foi reproduzido por meio de um centro de usinagem ROMI Discovery 760, 11 kW, comando Siemens 810, rotação de 10 a 10000 rpm. Os ensaios foram realizados com os parâmetros de corte descritos na Tab.1. A ferramenta de corte foi uma ponta montada de óxido de alumínio rosa, especificação A151/4AR6005V, segundo a norma ISO 525, fabricante CARBURUNDUM. Devido as pequenas dimensões desta ferramenta, ela possui poucos grãos abrasivos e facilita para comparação com o único grão abrasivo utilizado para os ensaios de simulação. Esta ponta montada foi acoplada a um dispositivo projetado, em Alumínio comercial ABNT 1100, em similaridade a um rebolo tipo copo reto com diâmetro externo de 76,2 mm (Fig. 1). Para garantir balanceamento do

sistema, foi necessário acoplar uma segunda ponta montada diametralmente oposta à primeira de forma que seu posicionamento fosse 0,5 mm acima da face da superfície a ser usinada. O material da peça é o aço ABNT N2711M (44 HRC), bastante empregado na fabricação de moldes de injeção de plásticos, matrizes para extrusão e moldes para sopro. Ele possui boa usinabilidade, boa polibilidade e dureza homogênea. Foi preparada uma amostra com dimensões 40mm x 20mm x 4mm.

Tabela 1 – Parâmetros de corte do ensaio experimental

Parâmetros de entrada	
Velocidade de corte (vs)	15 m/s
Velocidade periférica da peça (vw)	250 mm/min
Profundidade de corte (ap)	0,015 mm
Atmosfera de trabalho	A seco
Número de passes	1

Na Figura 1 é apresentada uma vista frontal do sistema de montagem do suporte, ferramenta e peça utilizados no ensaio experimental para reproduzir o processo de retificação frontal.

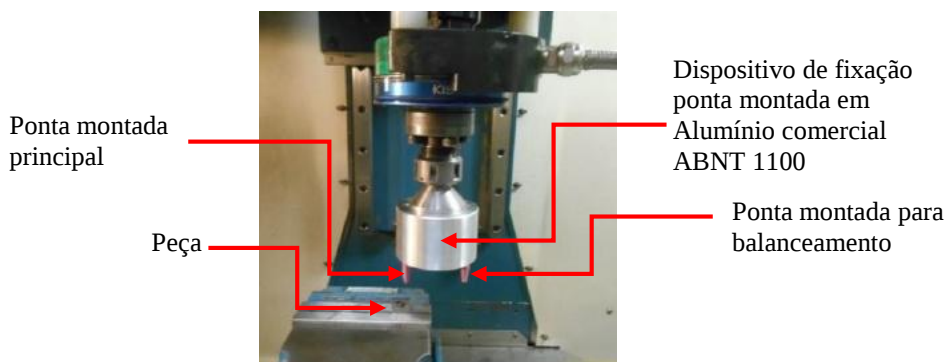


Figura 1. Vista geral do sistema de montagem suporte-ferramenta-peça.

A aquisição do sinal de força foi feita por meio de um dinamômetro rotativo Klister 9123C, capacidade máxima de ± 20 kN, a uma taxa de 1,5kHz e com interface gráfica de monitoramento em software National Instruments.

2.2. Ensaio de simulação numérica

As componentes das forças de contato no grão abrasivo durante a passagem pela peça foram calculadas por solução numérica via método dos elementos finitos. Para isso, a fim de simplificar o modelo, adotou-se como modelo físico com apenas um grão abrasivo em dimensões reduzidas bem como a área de contato deste com a superfície da peça. A simulação computacional foi realizada com auxílio do software Ansys Workbench® 14.5 package Explicit Dynamics. A geometria do grão foi modelada de acordo com o modelo proposto por Li, (2010), que empregou um grão em forma piramidal. Embora a classificação geométrica dos grãos seja complexa, experimentos mostram que a formação do cavaco na retificação se dá por conta do formato do grão com ângulos de incidência negativa proposta (Ohbuch, *et al.*, 2006). A Figura 2 apresenta a morfologia pontiaguda dos grãos de óxido de alumínio rosa, granulometria mesh 60.

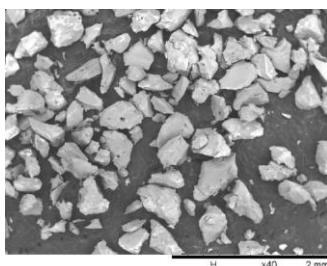


Figura 2. Foto de grãos de óxido de alumínio rosa, granulometria mesh 60.

As dimensões do grão foram baseadas na classificação FEPA para granulometria mesh 60, cujo diâmetro médio do grão é 253 μm . Assim para a geometria piramidal do grão foi selecionada com altura de 140 μm e base quadrada com lado igual a 280 μm , sendo envolvido por uma resina tipo epóxi bi-componente. A geometria da peça consiste em um

retângulo de $2000\ \mu\text{m} \times 2000\ \mu\text{m} \times 2000\ \mu\text{m}$, o que representa uma pequena porção da peça. Utilizou-se como profundidade de corte (a_p) do grão na peça $15\ \mu\text{m}$ (Fig. 3a). Devido à limitação computacional, a malha foi refinada somente na região onde ocorre contato e o tempo de execução da simulação foi restringido em no máximo 96h. Buscou-se criar uma malha com elementos hexagonais de forma mais regular possível tornando o resultado mais preciso neste caso, de acordo com Tutorial Workbench 2010 (Fig.3b).

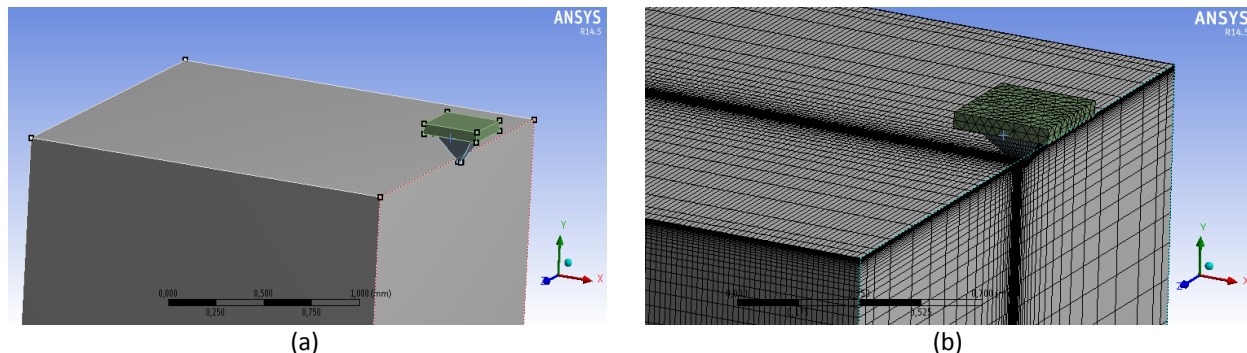


Figura 3. Detalhes: da geometria do grão abrasivo e ligante (a) e posicionamento do grão em relação à peça (b).

As condições de contorno impostas ao modelo, em termos de restrições, foi o engastamento da peça no plano inferior XZ e deslocamento nulo do grão na direção Y. O tempo total de simulação será de 3E-5s, que é o necessário para o grão se deslocar por toda a peça, desconsiderando a margem de erro de energia.

O software Ansys® possui vários modelos constitutivos para diferentes materiais. O material da peça foi selecionado o modelo de Johnson-Cook, que é amplamente utilizado em materiais tipicamente metálicos submetidos a grandes deformações, grandes taxas de deformação e altas temperaturas (Johnson e Cook, 1983). O material do grão abrasivo foi selecionado o modelo de Johnson-Holmquist. As propriedades e valores para os modelos se encontram disponível na biblioteca do aplicativo WORKBENCH do software Ansys®.

Os parâmetros de saída a serem obtidos pelo Ansys® foram as componentes das forças de contato que atuam no grão abrasivo segundo os sistema de referência adotado (eixo X tangencial, eixo Z longitudinal, e eixo Y - normal).

3. RESULTADOS

Na Figura 4 é apresentado um conjunto de três gráficos com resultados obtidos para cada componente da força registrada pelo dinamômetro nos ensaios experimentais.

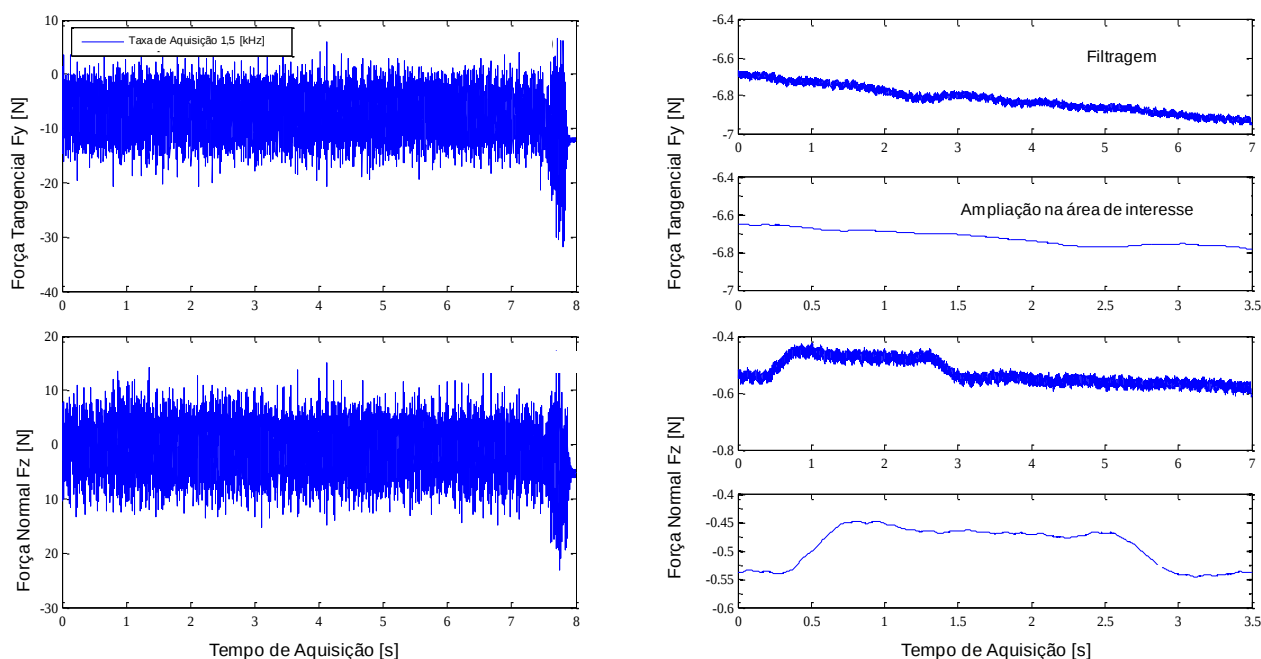


Figura 4. Resultados das componentes da força de retificação com ponta montada com sistema de filtro dos sinais detalhe durante o tempo de retificação com as condições de corte: $v_s=15\ \text{m/s}$, $v_w=0,250\ \text{m/min}$ e $a_p=0,015\ \text{mm}$.

O primeiro à esquerda representa o sinal sem tratamento. Um segundo gráfico é o resultado após aplicação de filtro tipo média móvel a cada 200 pontos, na qual define o comportamento e magnitude da força. Em seguida, em um terceiro gráfico é apresentada uma ampliação no intervalo de tempo onde ocorre o contato entre ferramenta e peça. Conforme esperado, a componente da força normal foi superior às componentes tangencial (Malkin e Guo, 2008). Em função de o valor da componente da força normal ser superior, foi possível a análise do comportamento da força tangencial, pois conforme esperado a magnitude das forças adquiridas foi pequena em função da restrita área de atuação dos grãos abrasivos. Na Figura 5 são mostrados os valores das componentes de força em função do tempo de simulação. Observa-se que os valores da componente normal foram maiores, indicando que há um comportamento semelhante aquele observado nos ensaios experimentais, ressaltando que são valores para um único grão abrasivo. Em média os valores da componente de força normal da simulação são em média 10 vezes menores que o registrado nos ensaios experimentais.

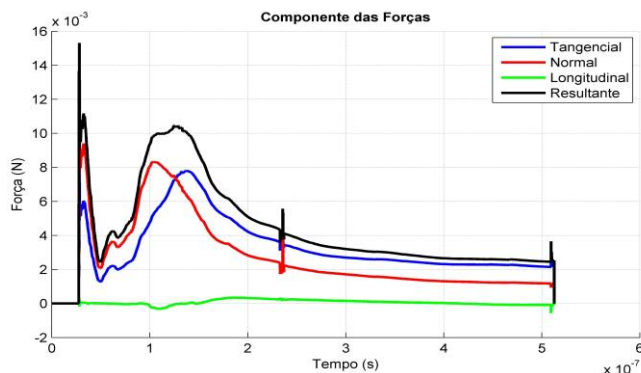


Figura 5. Comportamento das componentes da força: tangencial, normal e longitudinal.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Embora o comportamento das componentes de forças obtidas nos ensaios experimentais (Fig. 4) não foi tão claro assim como no ensaio de simulação (Fig. 5) as considerações não serão feitas em termos da estabilização das forças mais sim para situação mais crítica, entrada do abrasivo na peça.

Conforme comentado na literatura por Rowe, (2010) e Lal, (1968) a componente de força na direção longitudinal exerce pouca influência sobre a resultante da força de retificação quando comparada com as componentes tangencial e normal. Isto é devido a elevada relação de v_w/v_s , ($2,78E-4$) isto foi confirmado tanto experimentalmente quanto por simulação numérica.

Os valores obtidos nos ensaios experimentais das componentes tangencial e normal possuem maior ordem de grandeza, o que pode ser atribuído à maior densidade linear de grãos abrasivos ativos presente na face da ponta montada. De acordo com Srihari *et al.* (1994) a densidade linear para grana 60 é de no máximo dois grãos/mm. De acordo com a magnitude das forças obtidas experimentalmente, as componentes de força normal e tangencial e em função da largura de corte de 4 mm e avanço por volta em torno de 0,05 mm em torno de 6 grãos em contato com a peça determina-se a força por cada grão respectivamente: $11E-3$ N e $5E-3$ N.

Além disso, nos ensaios de simulação considerou-se a ação de apenas um grão abrasivo, e em função disto os valores das componentes de força normal e tangencial são respectivamente: $9E-3$ N e $6E-3$ N. A resposta fornecida pelo software de simulação indica uma concordância com relação às componentes normal e tangencial. Apesar de ser um estudo ainda incipiente em que o refino da malha não foi ainda investigado para determinar a convergência do resultado em relação ao experimental, os resultados indicaram um erro relativo em relação à força normal e tangencial respectivamente de 18% e 20%.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados e discussões realizados pode-se concluir que:

- Os valores das componentes da força normal e tangencial fornecidas pelo software foram $11E-3$ N e $5E-3$ N, respectivamente.
- Os valores das componentes das forças obtidos experimentalmente foram inferiores a 7N, valores bem superiores aqueles obtidos via simulação;
- A componente da força longitudinal de retificação tanto experimental quanto calculada foi praticamente desprezível e está de acordo com o que é relatado na literatura, pois representa a menor parcela comparada com as outras componentes.
- A simulação numérica do processo permitiu reproduzir proporcionalmente o processo de retirada de material por abrasão e, portanto, indicando que esta metodologia pode continuar sendo explorada para o processo de retificação.

6. REFERÊNCIAS

- ANSYS EXPLICIT DYNAMICS TRAINING MANUAL, 2010.
- Johnson, G. R., Cook, W. H., 1983 “A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures”. Contract F08635-81-C-0179, U.S. Air Force, Honeywell Independent Development Program.
- Lal, G.K., March 1968, “Forces in vertical surface grinding”, International Journal of Machine Tool Design and Research, Volume 8, Issue 1, Pages 33-43, ISSN 0020-7357, [http://dx.doi.org/10.1016/0020-7357\(68\)90009-7](http://dx.doi.org/10.1016/0020-7357(68)90009-7).
- Li, X., 2010, “Modeling and simulation of grinding processes based on a virtual wheel model and microscopic interaction analysis”, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE.
- Malkin, S., Guo, C., 2008, “Theory and Application of Machining with Abrasives, Grinding Technology”. Ellis Horwood Limited.
- Ohbuch, Y., Obikawa, T., 2006, “Surface Generation Model in Grinding with Effect of Grain Shape and Cutting Speed”. SME International Journal, Series C, Vol.49, No 1.
- Perveen, A., Rahman, M., Wong, Y. S., April 2014, “Modeling and simulation of cutting forces generated during vertical micro-grinding”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Volume 71, Issue 9-12, pp 1539-1548.
- Rowe, W. B., 2009, “Principles of modern Grinding Technology”. Ed. William Andrew, 1 ed., Oxford, UK.
- Srihari, G., Lal, G.K., July 1994, “Mechanics of vertical surface grinding”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 44, Issues 1–2, Pages 14-28, ISSN 0924-0136, [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90034-5](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(94)90034-5).

7. AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, pela oportunidade de realizar trabalhos envolvendo usinagem, fornecendo todo suporte necessário, através de seus técnicos e professores. Os autores deste trabalho agradecem a CAPES, CNPq e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFU pelo apoio financeiro. Eles agradecem também a PROPP/PIBIC-CNQP-UFU pela concessão de bolsa de IC para um dos autores, via projeto no. IC-CNPQ2015-0362. Um dos autores agradece em especial a FAPEMIG pelo apoio financeiro recebido via PPM-VII, Processo N°: PPM-00265-13.

8. ABSTRACT

The magnitude of components of the force involved in the grinding process is dependent on the tribological interactions between abrasive grain and workpiece. Because it is a very expensive and high time spending process, once the removal rate volume is low compared, to other processes such as milling, for example, it is important seek alternative reliable techniques that preferentially do not require experimental trials. An alternative is to use computational numerical methods. Thus, this work aimed to determine the components of the active forces on a single abrasive grain on the surface ABNT N2711M steel through computer simulation tests based on the technique of finite element following the model proposed by Johnson-Cook. The input parameters were: grinding wheel speed of 15 m/s, speed that grain passes through of the workpiece, and depth of cut equal of 0.015 mm. The simulation results were compared with those obtained experimentally in a CNC machining center, in which is employed mounted point with more than one abrasive. The results showed that the forces values obtained by simulation are proportional to those obtained by experimental trials and show their magnitudes are in agreement with those commonly reported in the force literature for semi-finishing grinding process.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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