

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE POSIÇÃO PRIMÁRIO DA FERRAMENTA DE CORTE DO TORNEAMENTO NA RUGOSIDADE SUPERFICIAL UTILIZANDO O SOFTWARE GEOGEBRA

Matheus Philippe Martins da Cruz, matheus-philippe2009@hotmail.com¹

Elhadji Cheikh Talibouya Ba, cheikh.ba460@hotmail.com¹

Alysson Martins Almeida Silva, alysson_fisica@yahoo.com.br²

Gabriel Vitor Costa Ferreira, gabrielvcostaf@hotmail.com¹

Matheus Hernane Sena Costa, theusmhsc@hotmail.com¹

Bruno Júnio Quaresma Rezende, brunojunio.rezende@gmail.com¹

Paulo Sérgio Martins, paulo.martins@prof.una.br¹

¹Centro Universitário UNA, Engenharia Mecânica, Rua dos Aimorés, 451, Lourdes, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil.

²Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica – Campus Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900, Brasília, Distrito Federal – Brasil.

Resumo: O processo de torneamento, empregado em peças cilíndricas e de revolução, é uma das técnicas mais utilizadas da usinagem convencional, e seu estudo se fundamenta na análise dos parâmetros de corte aliados a uma complexidade de fenômenos que ocorrem durante a remoção de material. Através de um modelo matemático realizado no software Geogebra, este trabalho buscou estabelecer uma relação entre as variáveis avanço por rotação no torneamento, a geometria de corte da ferramenta – raio da ponta de corte e ângulo de posição primário –, e o resultado do corte no que diz respeito à rugosidade superficial. Obtiveram-se, dessa forma, as relações matemáticas entre estas quatro variáveis, as quais foram comparadas com dados presentes na literatura e com experimentos em laboratório com o material alumínio. Os parâmetros de rugosidade estudados foram o desvio médio aritmético (R_a), desvio médio geométrico (R_g) e a rugosidade média (R_z). O modelo matemático resultou numa equação que calcula o máximo valor do ângulo de posição primário capaz de influenciar na rugosidade superficial da peça de trabalho, bem como um ábaco para cálculo da rugosidade aritmética R_a .

Palavras-chave: Torneamento, ângulo de posição, rugosidade superficial, geometria de corte.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação em que a matéria-prima obtém uma mudança de forma através da remoção de cavaco. Dentre os processos da Usinagem convencional, a técnica de fabricação com remoção de material mais utilizada, segundo Chauhan e Singh (2016), é o torneamento, comumente empregado em peças cilíndricas e de revolução. O processo de torneamento é utilizado para modificar o formato de uma peça fixando-a a um mandril de um torno e submetendo-o a alta rotação, enquanto a ferramenta de corte é presa firmemente e percorre o corpo do material na mesma direção do eixo de rotação da peça, removendo cavaco. Esse processo possui uma variedade de ferramentas de corte, no entanto, todas elas têm formatos semelhantes (Stoeterau, 2000). As ferramentas de corte do torneamento diferem entre si principalmente pelo seu material de fabricação e pela sua geometria de corte.

Um parâmetro importante avaliado nos processos de fabricação, especialmente na usinagem convencional, é a rugosidade superficial. A classificação dos processos conforme a rugosidade é definida pela norma NBR ISO 1302:2002. A norma informa que, em condições normais de usinagem, o torneamento compreende faixas de rugosidade média e fina, com valor médio de 3,2 μm , podendo chegar a 0,8 μm , ou, em condições especiais, a 0,4–0,3 μm no parâmetro R_a (segundo a norma, em relação à rugosidade aritmética R_a , o torneamento é, em média, melhor que processos como a limeagem e o aplainamento, no entanto não é melhor que a fresagem, a retífica e o brunimento). São inúmeros os fatores que influenciam a rugosidade superficial no torneamento, dentre os quais podem-se citar os parâmetros de corte (velocidade de corte, p.e.), a ferramenta de corte (material de fabricação e geometria da ferramenta), a usinabilidade da peça, a estabilidade de forças do torno e até mesmo a ocorrência de fenômenos de corte, como a aresta postiça de corte (APC) e o excesso de vibração no ambiente da usinagem. Dentre os parâmetros de rugosidade superficial mais utilizados, citam-se a rugosidade média (R_z), rugosidade quadrática (R_q) e a rugosidade aritmética (R_a), sendo essa última a mais utilizada no torneamento.

É importante para um processo de corte que se possa prever o resultado, no que diz respeito à rugosidade superficial da peça. Para isso, vários autores contribuíram com estudos e fórmulas matemáticas para calcular a rugosidade R_a . Cassier (apud. SANTOS; SALES, 2007) definiu R_a em função de dois parâmetros de corte: o avanço por rotação f e o raio da ponta da ferramenta r_ϵ . Sua fórmula é definida pela Eq. 1. Prasad (apud. Oliveira et. al.) chegou a uma fórmula semelhante, mostrada na Eq. 2.

$$R_a = \frac{f^2}{31 r_\epsilon} \quad (1)$$

$$R_a = \frac{f^2}{18 \sqrt{3} r_\epsilon} \quad (2)$$

Drozda (apud. Oliveira et. al., 2000) também contribuiu com uma relação matemática cujo cálculo é menos prático que os anteriores. O cálculo de R_a é mostrado na Eq. 3, em que B, H e G não são parâmetros de corte selecionados no torno, mas medidas retiradas do perfil microgeométrico de rugosidade, sendo mais trabalhosas de serem obtidas na prática.

$$R_a = \frac{2 (r_\epsilon \cdot B - H \cdot G)}{f} \quad (3)$$

Os autores Oliveira et.al. (2000) também calcularam a rugosidade média aritmética R_a em função do avanço e do raio da ferramenta utilizando o cálculo integral e o método numérico de Newton-Raphson.

Essas soluções matemáticas, apesar de abrangerem os parâmetros mais relevantes do perfil de rugosidade e obterem previsões na maioria das vezes satisfatórias, evidentemente não consideram todo o universo de fenômenos que ocorrem simultaneamente durante o corte no torno. Um dos parâmetros ainda não inseridos nas fórmulas supracitadas é a geometria de corte da ferramenta. Segundo Amorim (2002), “a geometria da ferramenta é um dos fatores de maior influência no torneamento”.

As ferramentas de corte do torneamento têm suas geometrias definidas pela norma ABNT NBR 6163/1989, que divide a ferramenta em vistas (ou planos), e, em cada uma delas, denomina seus vértices, arestas e ângulos. No presente estudo, será avaliada qual influência a rugosidade sofre quando se altera o ângulo de posição primário χ_r do plano de referência p_r da ferramenta. A importância desse ângulo no processo se deve ao fato de que ele constitui a aresta de corte, e, portanto, se localiza na região da ferramenta que está à frente no movimento de avanço, interagindo com a peça com maior intensidade. O plano de referência p_r da ferramenta é a vista superior da ferramenta, quando em contato com a peça durante o processo de corte. A Fig. 1 apresenta o plano p_r e a localização do ângulo χ_r .

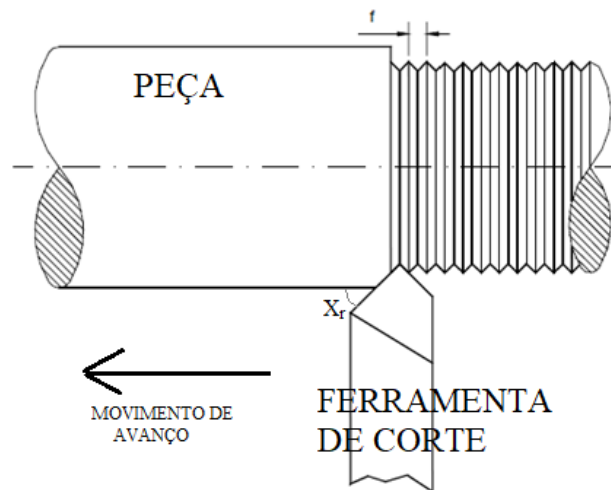


Figura 1 – Processo de torneamento e plano de referência da ferramenta.

Santos e Sales (2007) constataram que o ângulo χ_r influencia na rugosidade superficial reduzindo as marcas de avanço para valores de χ_r pequenos. O autor Reis (2000) também avaliou a influência da geometria de corte na rugosidade, modificando os ângulos de posição primário e secundário, mas utilizando ferramenta sem raio de ponta. Ele também concluiu, através de uma fórmula matemática e de procedimentos experimentais, que a redução dos ângulos de posição reduz também a rugosidade da peça, mas sua análise não se aplica para ferramentas com raio de ponta.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é determinar, através de uma modelagem matemática construída no software Geogebra, como se dá a influência do ângulo de posição primário da ferramenta na rugosidade superficial da peça torneada. Buscou-se inserir a variável χ_r no cálculo da rugosidade superficial, obtendo-se as condições nas quais o

ângulo pode causar melhoria na rugosidade, facilitando a escolha da ferramenta de corte em um determinado processo em função da sua geometria.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental se dividiu em quatro partes: (1) um estudo da geometria do ângulo de posição primário para definir a sua influência no perfil de rugosidade da peça torneada; (2) A construção e aplicação de um modelo matemático feito no software Geogebra para os cálculos da área dos picos e vales do perfil rugoso teórico resultante de um processo de torneamento, e das rugosidades R_a , R_q e R_z ; (3) um experimento em laboratório no qual o alumínio foi submetido ao torneamento utilizando ferramentas de aço rápido com geometria definida; e (4) a comparação dos valores coletados no laboratório com o resultado do Geogebra e também com a previsão da fórmula matemática da Eq. 1.

2.1. Estudo do perfil de rugosidade da peça torneada

A Fig. 2 apresenta uma vista microscópica do perfil teórico de rugosidade de uma peça torneada, no plano de referência da ferramenta. Nesta representação, assumiu-se que, se χ_r for pequeno o suficiente, a aresta de corte removerá uma parte do pico de rugosidade (linhas tracejadas), modificando o perfil rugoso da peça, e consequentemente reduzindo o valor de rugosidade.

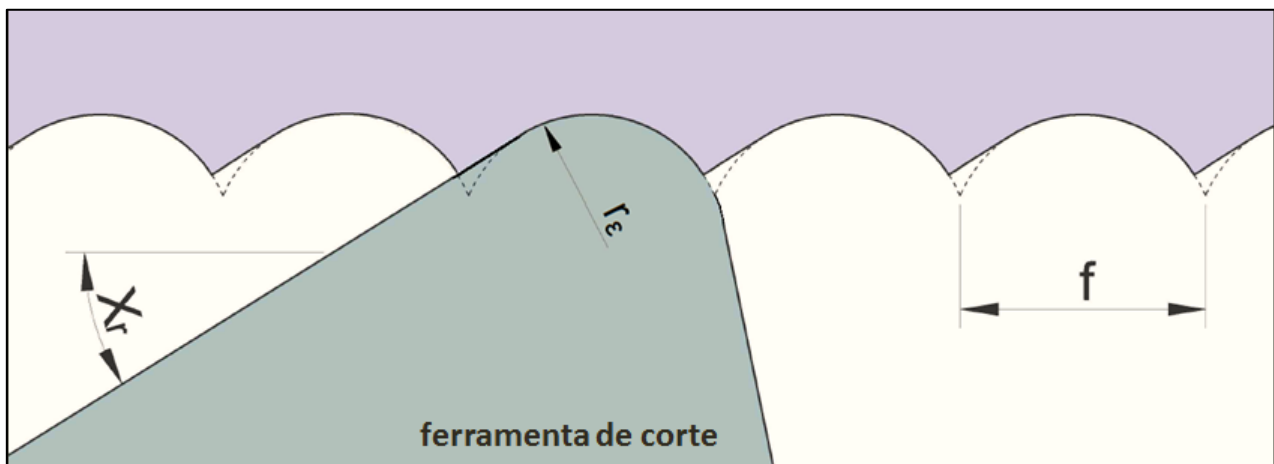


Figura 2 - Representação do perfil de rugosidade teórico do processo de torneamento.

Obtém-se, assim, um perfil de rugosidade teórico que não depende apenas do avanço f e do raio r_ϵ , mas também do ângulo χ_r , caso ele seja pequeno o suficiente.

Uma vez compreendida a influência do ângulo χ_r , foi construído, utilizando o software Geogebra, uma representação interativa do perfil de rugosidade, semelhante ao da Fig. 2, onde se consegue alterar os valores de f , r_ϵ e χ_r utilizando controles deslizantes. O programa, então apresenta quatro dados de saída: a rugosidade utilizando a fórmula da Eq. 1, as rugosidades R_a , R_q e R_z calculadas a partir das integrais entre as curvas do desenho.

2.2. Parâmetros do experimento no laboratório

Depois, no laboratório de Usinagem do Centro Universitário UNA, foram realizados torneamentos em corpos de prova de alumínio com diâmetro inicial $d = 20,2 \text{ mm}$, e profundidade de corte $a_p = 5 \text{ mm}$, em um torno de bancada de modelo MR-334 MANROD (Fig. 3). O rugosímetro utilizado para medição (Fig. 4) é um modelo Mitutoyo, que mede os parâmetros R_a , R_q e R_z . A medição foi realizada segundo a norma ISO1997, com velocidade da agulha de $0,5 \text{ mm/s}$.

Foram realizados 24 torneamentos, intercalando-se três valores de avanço por rotação ($0,07$, $0,14$ e $0,28 \text{ mm/rot}$) e oito valores de ângulo de posição primário (5° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° e 70°). Os corpos de prova são mostrados na Fig. 5.

As ferramentas de corte de aço rápido utilizadas (Fig. 6) foram fabricadas todas com a mesma geometria, exceto pelo ângulo de posição. A ferramenta que possui ângulo de 10° foi utilizada com inclinação de 5° no sentido horário para simular o ângulo $\chi_r = 5^\circ$.

O raio de ponta das ferramentas é de $r_\epsilon = 0,2 \text{ mm}$ e todos os torneamentos foram realizados com ponta. Os valores coletados foram comparados com o cálculo do Geogebra e com o cálculo da Eq. 1.

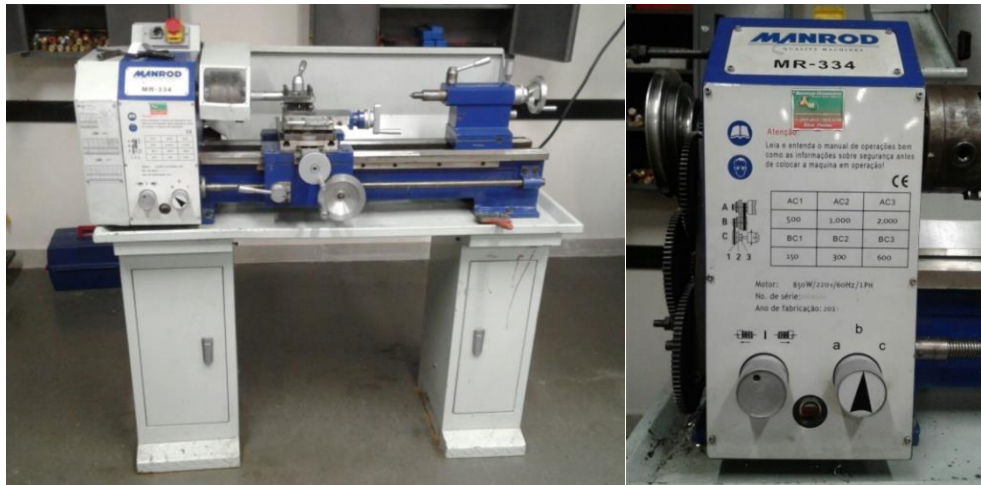


Figura 3 – Torno de modelo MR-334 MANROD.

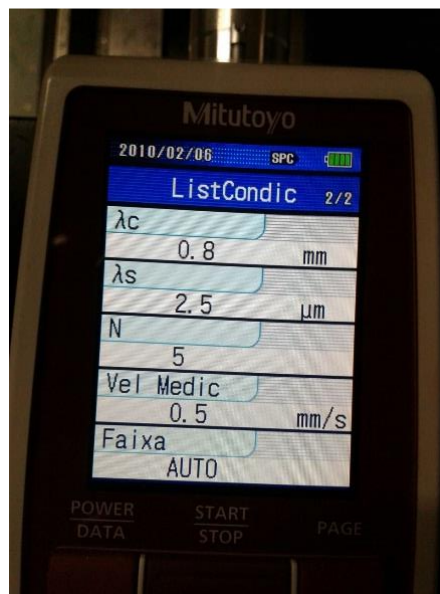


Figura 4 – Rugosímetro Mitutoyo.



Figura 5 – Corpos de prova de alumínio



Figura 6 – Ferramentas de corte de aço rápido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 7 representa o perfil de rugosidade da peça. A aresta de corte está na iminência de influenciar o perfil de rugosidade, pois, se χ_r fosse menor, o pico de rugosidade seria removido parcialmente pela aresta de corte, assumindo aspecto semelhante ao da Fig. 2.

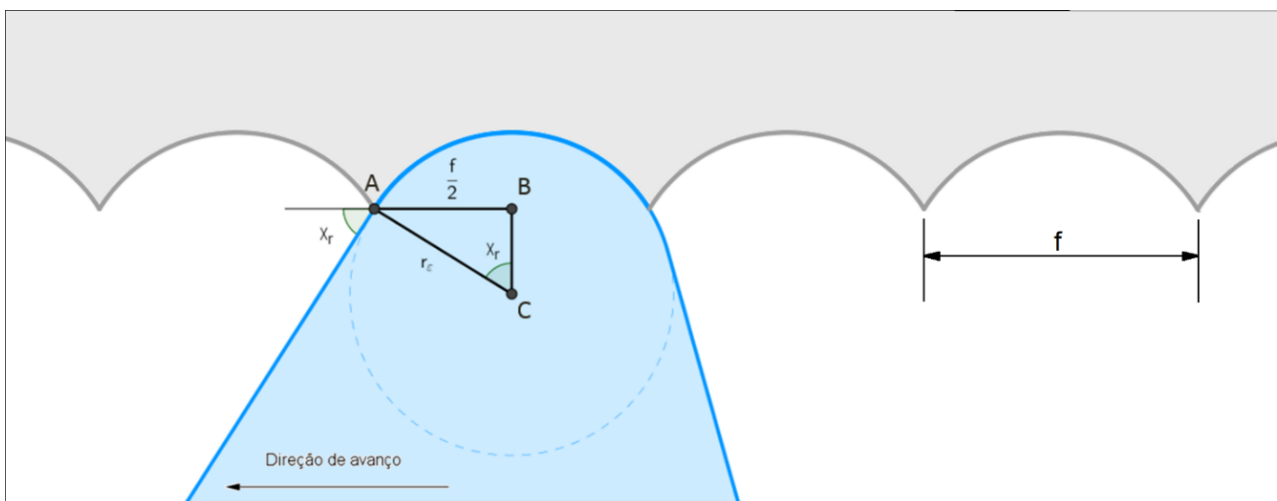


Figura 7 – Perfil de rugosidade teórico no torneamento.

Através da análise do triângulo retângulo ABC da Fig. 7, em que C é o centro do raio de ponta e A está localizado no pico de rugosidade, construiu-se a Tab. 1, onde foi constatado que:

Tabela 1 - Dedução matemática do limite de influência do ângulo χ_r na rugosidade da peça.

Se:	Então:
$\chi_r > \sin^{-1}\left(\frac{f}{2r_\epsilon}\right)$	A aresta de corte não toca o perfil de rugosidade
$\chi_r = \sin^{-1}\left(\frac{f}{2r_\epsilon}\right)$	A aresta de corte está na iminência de tocar o perfil de rugosidade
$\chi_r < \sin^{-1}\left(\frac{f}{2r_\epsilon}\right)$	A aresta de corte modifica o perfil de rugosidade

Os valores então localizados nos intervalos $0 < \chi_r \leq \pi \text{ rad}$ e $0 \leq \frac{f}{r_\epsilon} \leq 2$. Definiu-se, portanto, a equação do limite de influência do ângulo de posição da ferramenta de corte (Eq. 4).

$$\chi_r = \sin^{-1}\left(\frac{f}{2r_\epsilon}\right) \quad (4)$$

A representação geométrica do perfil de rugosidade, para os três casos mencionados na Tab. 1, pode ser observada na Fig. 8. Da esquerda para a direita, o ângulo χ_r decresce. Observando os triângulos ABC e A'B'C', nota-se que a aresta de corte reduzirá os picos de rugosidade apenas quando A'B' for menor que AB.

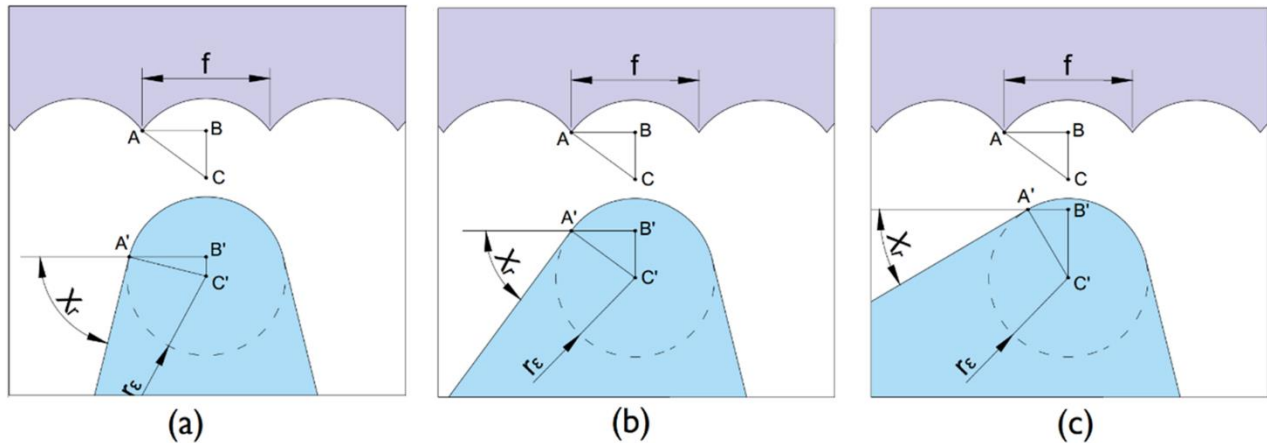


Figura 8 – Representação do perfil de rugosidade. (a) sem influência do ângulo χ_r , (b) na iminência da influência do ângulo χ_r , e (c) com influência do ângulo χ_r .

3.1. O modelo matemático no Geogebra

Ao elaborar o modelo matemático no software (Fig. 9), o mesmo foi armazenado no acervo online do GeoGebra e pode ser acessado através do link <https://ggbm.at/Nmd4UzDQ>. O modelo apresenta o desenho interativo de um período do perfil de rugosidade, e três controles deslizantes (avanço f , raio da ponta da ferramenta r_ϵ e ângulo de posição χ_r .) Utilizando-se o modelo, foram coletados dados de saída para R_a , R_q e R_z . Utilizando o Excel, esses dados foram organizados em três ábacos (um para cada parâmetro de rugosidade). Um dos ábacos, para R_a , é mostrado na Fig. 10.

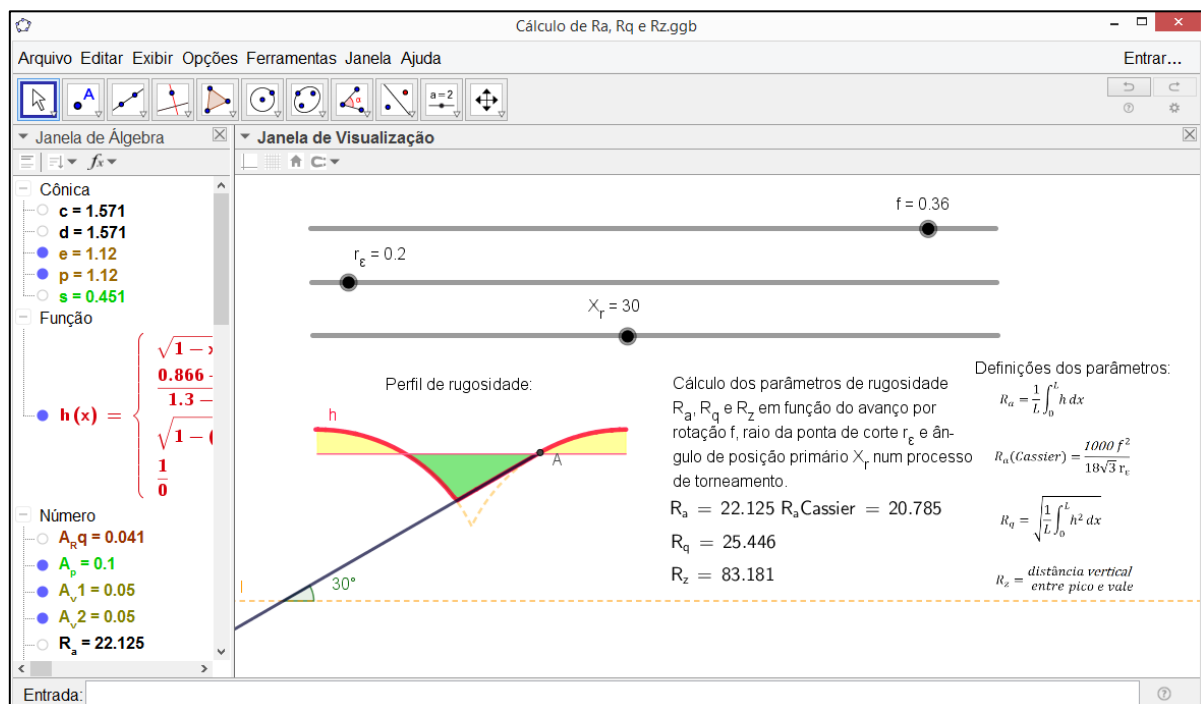


Figura 9 – Modelo matemático na interface do Geogebra.

A curva tracejada do ábaco, por sua vez, é a curva da equação do limite de influência do ângulo (Eq. 4). Os valores à esquerda da curva representam torneamentos realizados com a influência do ângulo χ_r , isto é, quando a aresta de corte

remove parcialmente os picos de rugosidade (que é o caso da Fig. 8c). Já nos valores à direita da curva, a rugosidade é constante mesmo com a variação do ângulo.

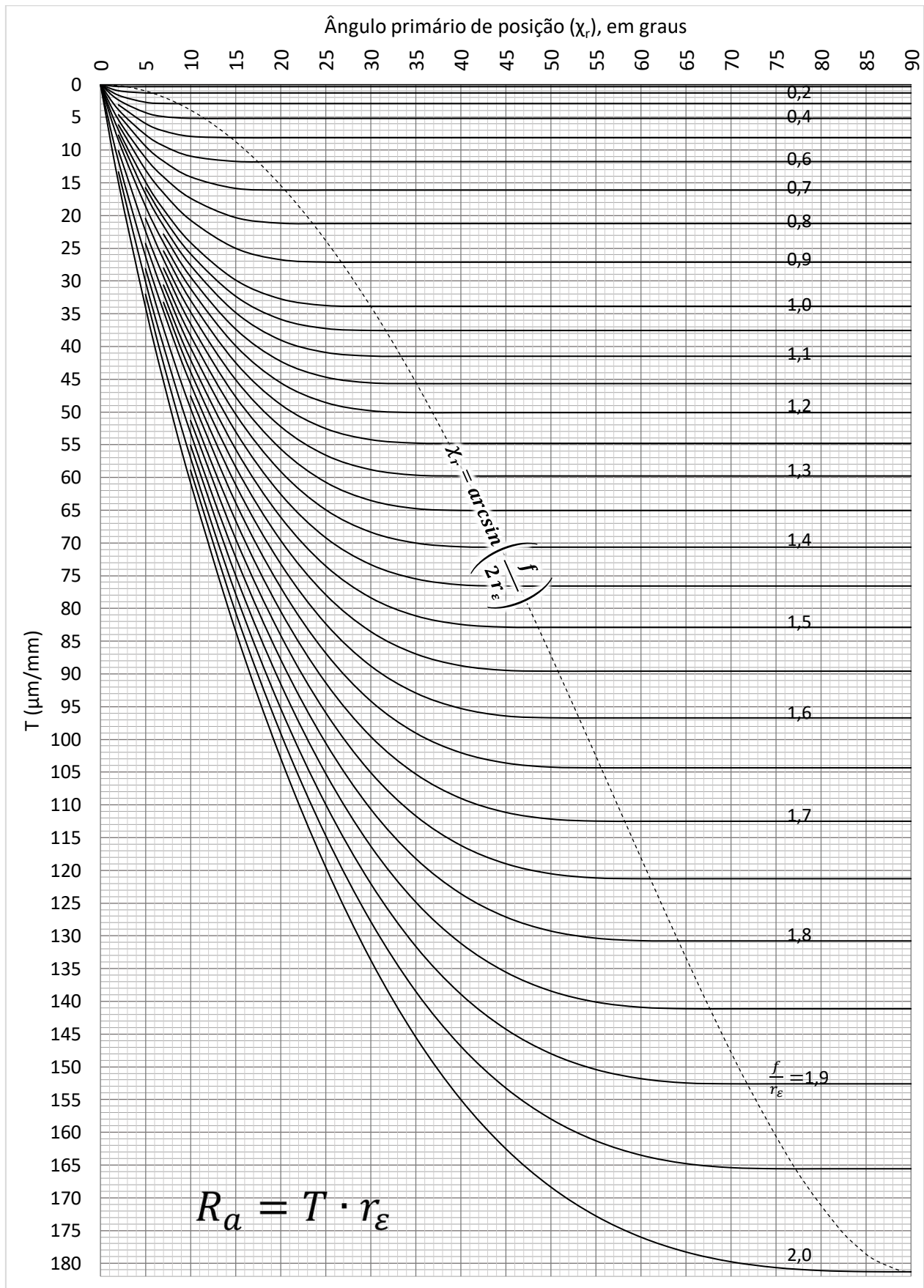


Figura 10 – Ábaco da rugosidade aritmética R_a em função de f , r_ϵ e χ_r .

Para utilizar o ábaco, é necessário: (1) escolher o valor de χ_r no eixo horizontal; (2) projetar esse valor em uma das curvas correspondentes à razão $\frac{f}{r_e}$, localizando um ponto nessa curva (se esse ponto se encontrar à direita da linha tracejada, significa que o ângulo de posição da ferramenta é pequeno o suficiente para reduzir as marcas de avanço da peça.); (3) localizar a coordenada y (eixo vertical) desse ponto, obtendo o valor de T , e (4) utilizar a Eq. 5 para, em função do T obtido, calcular a rugosidade aritmética R_a do processo.

$$R_a = T \cdot r_e \quad (5)$$

3.2. Os resultados coletados em laboratório

Os resultados obtidos no laboratório para o material alumínio foram organizados nas Fig. 11, 12 e 13, juntamente com a previsão do modelo matemático e a fórmula de Cassier (Eq. 1), para fins de comparação. As curvas que passam pela origem são curvas do ábaco da Fig. 10.

Observa-se que, para o avanço de 0,07 mm/rot, foram atingidas menores rugosidades (em relação aos outros dois avanços) e, no entanto, os pontos se mostraram mais distantes, em percentual, da curva do Geogebra (e até mesmo da previsão de Cassier) se comparados aos outros dois gráficos.

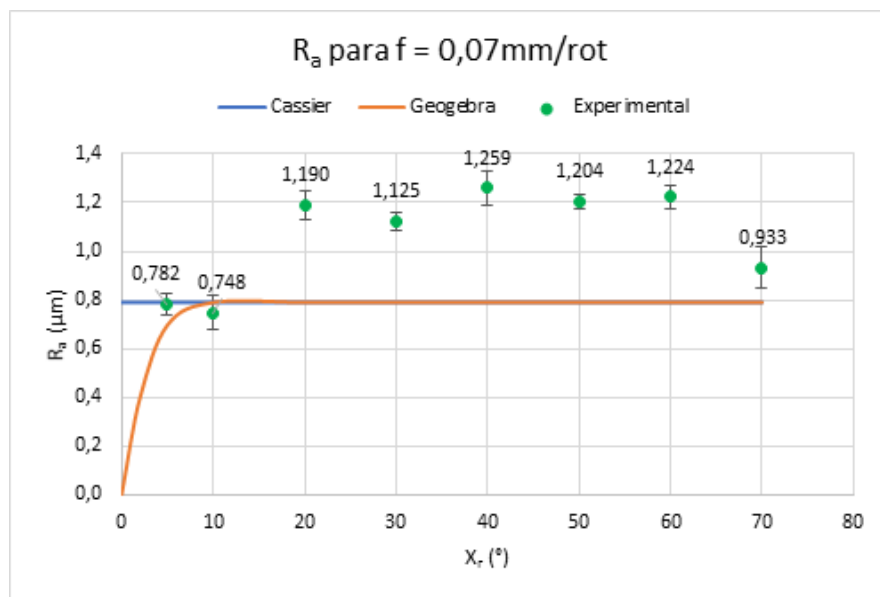


Figura 11 – Comparação de resultados para o avanço de 0,07 mm/rot

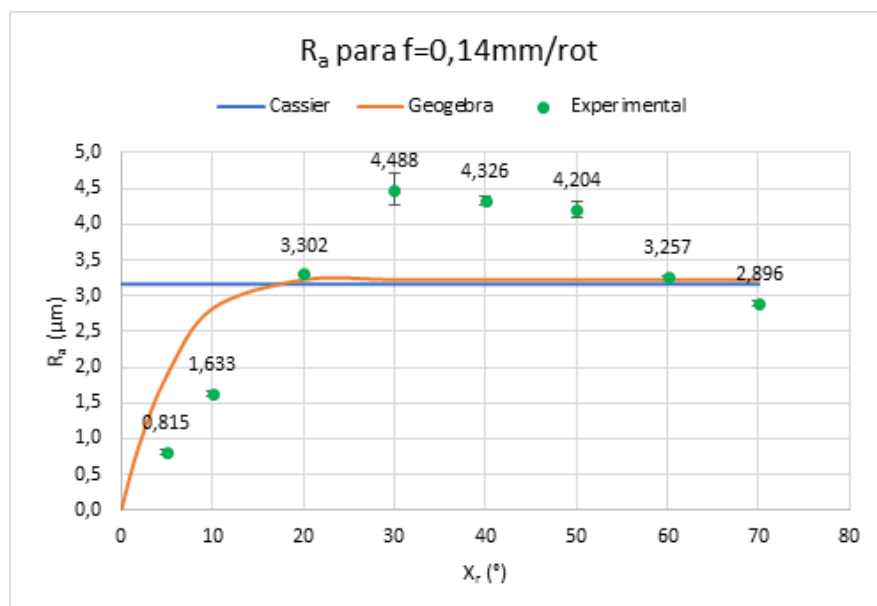


Figura 12 – Comparação de resultados para o avanço de 0,14 mm/rot

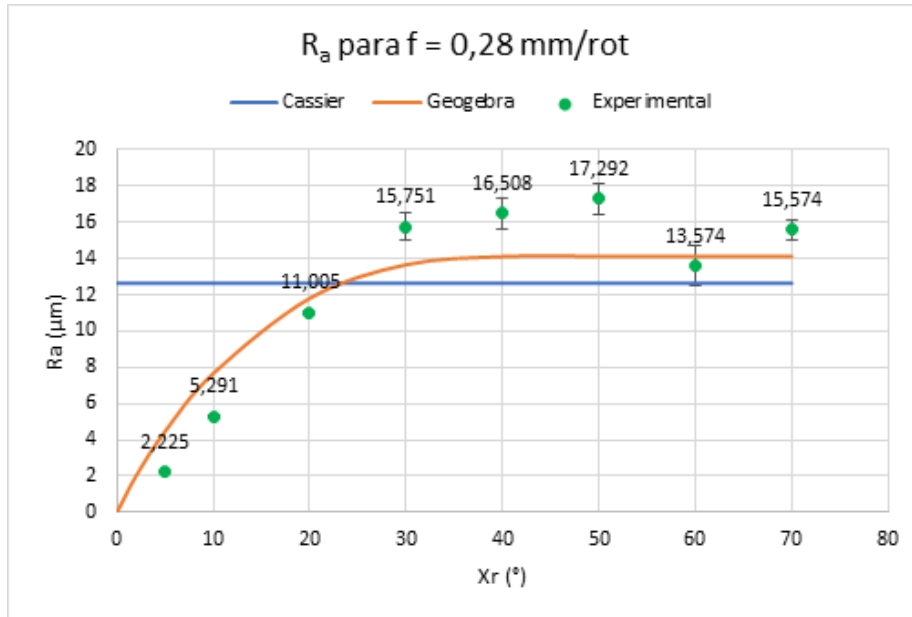


Figura 13 – Comparação de resultados para o avanço de 0,07 mm/rot

Conforme previsto pelo modelo matemático, os experimentos demonstraram uma tendência em alcançar rugosidades menores quando se utiliza ferramentas com ângulos de posição menores. Inclusive, na região de influência do ângulo, os valores de rugosidade obtidos experimentalmente chegaram a ser ainda menores que os teóricos.

Observou-se que a previsão do Geogebra foi mais efetiva para o maior valor de avanço ($f = 0,28 \text{ mm/rot}$), e menos efetiva para o menor ($f = 0,07 \text{ mm/rot}$). Isso porque, sendo f uma variável muito expressiva no cálculo da rugosidade, quando o avanço é maior, tem-se um maior percentual de influência desse parâmetro na rugosidade da peça. Em contrapartida, quando o avanço é menor, prevalece um percentual de influência de outras variáveis do processo, como vibração, ocorrência de aresta postiça de corte, ou mesmo erros de medição.

Houve também uma aparente tendência de se obter rugosidades menores para o ângulo de 70° (mas não tão menores quando os obtidos dentro da região de influência do ângulo), embora essa relação não tenha ficado clara para o avanço de $0,28 \text{ mm/rot}$.

Durante o experimento em laboratório, também foi observado que, apesar da vantagem da redução do ângulo χ_r na superfície da peça, ocorreram ruído e vibração para os ângulos de 5° e 10° . Esse fenômeno pode ter ocorrido devido a uma maior interação da aresta de corte na peça, provocando aumento das forças de corte e instabilidade do processo. Para solucionar o problema da vibração, foi aplicada maior força na manivela que controla a ponta do torno, aumentando a estabilidade do processo.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou como se dá a influência do ângulo de posição primário da ferramenta de corte no processo de torneamento, em relação à rugosidade superficial da peça. Constatou-se que a influência desse ângulo depende dos parâmetros de corte utilizados, e que, se χ_r for menor que $\sin^{-1}\left(\frac{f}{2r_e}\right)$, então a aresta de corte reduz a rugosidade da peça – assim como previsto por Santos e Sales (2007) –, tanto nos resultados teóricos, quanto experimentais. Embora a redução do ângulo tenha, na prática, aumentado a vibração e ruído do sistema durante o corte, foi possível estabilizá-lo utilizando a ponta do torno, atingindo rugosidades adequadas para o processo.

O modelo matemático, principal instrumento deste trabalho, possibilitou determinar os valores da rugosidade em função de f , r_e e χ_r , e organizar os dados de saída em um ábaco, que pode ser usado para o cálculo da rugosidade aritmética, facilitando também a visualização das regiões de influência e não-influência do ângulo de posição.

A partir do exposto, podem ser avaliados trabalhos futuros, como a repetição do procedimento experimental em um torno CNC, para reduzir erros do operador e atingir uma exatidão maior na rugosidade; e a avaliação das marcas de avanço para diferentes valores de ângulo de posição, através de uma análise microscópica de superfície.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Nipo Tec Ferramentas Industriais pelo fornecimento das ferramentas de corte com geometria bem definida e ao Centro Universitário UNA por disponibilizar o laboratório de Usinagem.

6. REFERÊNCIAS

- Amorin, Heraldo José de. “Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.
- Chaunan, Y.S., SINGH, D.P. “Experimental Investigation of Surface Roughness by Optimizing Process Parameter in Turning Operation of Aluminum Alloy”. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). Vol. 5 Issue 11. p. 583-587, 2016.
- Oliveira, J.A.C., et al. “Cálculo do desvio médio aritmético R_a em função do avanço”. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2000.
- Reis, Alexandre Martins. “Influence of tool end cutting edge angle, Tool nose radius and lubrication in machining under built-up edge conditions”. 2000. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000.
- Santos, S.C., SALES, W.F.S. “Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais”. Belo Horizonte, edição única. ArtLiber, 2007. p. 225.
- Stoeterau, R.L. “Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, [2000].

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY ABOUT THE INFLUENCE OF THE CUTTING TOOL'S CUTTING EDGE ANGLE OF THE TURNING ON THE SURFACE ROUGHNESS BY MEANS OF THE GEOGEBRA SOFTWARE

Matheus Philippe Martins da Cruz, matheus-philippe2009@hotmail.com¹

Elhadji Cheikh Talibouya Ba, cheikh.ba460@hotmail.com¹

Alysson Martins Almeida Silva, alysson_fisica@yahoo.com.br²

Gabriel Vitor Costa Ferreira, gabrielvcostaf@hotmail.com¹

Matheus Hernane Sena Costa, theusmhsc@hotmail.com¹

Bruno Júnio Quaresma Rezende, brunojunio.rezende@gmail.com¹

Paulo Sérgio Martins, paulo.martins@prof.una.br¹

¹Centro Universitário UNA, Mechanical Engineering, Rua dos Aimorés, 451, Lourdes, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil.

²Universidade de Brasília – College of Technology, Department of Mechanical Engineering – Darcy Ribeiro Campus, CEP: 70910-900, Brasília, Distrito Federal – Brasil.

Abstract: The turning process, used on cylindrical and revolution workpieces, is one of the most used technics of the conventional machining, and its studies are based on analysis of cutting conditions allied to a complexity of cutting phenomena which happens during the material removal. Through a mathematical model made in software Geogebra, this article substantiated the relations between the feedrate, the cutting tool geometry – the nose radius and the cutting edge angle – and the result of the process, concerning the surface roughness. Therefore, the mathematical relation between that four variables was obtained, and it was compared with literature database and with laboratory experiments using aluminum workpieces. The surface roughness parameters studied was the Mean Roughness (Roughness Average R_a), the Root Mean Square (RMS) roughness (R_q), and the Mean Roughness Depth (R_z). The mathematical model resulted in an equation which calculates the maximum cutting edge angle which can modify the workpiece's surface roughness, as well as a chart to calculate the Mean Roughness R_a .

Keywords: turning, cutting edge angle, surface roughness, cutting tool geometry.