

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INVESTIGAÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE TORNEADA DO AÇO SAE 4140
UTILIZANDO FERRAMENTAS COM GEOMETRIAS WIPER® E PRIME® ATRAVÉS DO
PROJETO DE EXPERIMENTOS BOX-BEHNKEN

por

Artur Aresi Delavald

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2017.

INVESTIGAÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE TORNEADA DO AÇO SAE 4140
UTILIZANDO FERRAMENTAS COM GEOMETRIAS WIPER® E PRIME® ATRAVÉS DO
PROJETO DE EXPERIMENTOS BOX-BEHNKEN

por

Artur Aresi Delavald

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Darci Barnech Campani

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Almir e Madalena e ao meu irmão Vítor, pela educação, pelo suporte, pelo amor, pelo apoio, pelo carinho e pela união na família nos momentos mais complicados que passamos.

À minha namorada Luísi, por todos anos de paciência, por todo o apoio dado, por todas as risadas, por todos os momentos felizes juntos, por todo o amor e pelo ouvido amigo para minhas queixas.

Ao professor André João de Souza, pelo empenho na orientação, pela dedicação e pela disponibilidade de auxiliar e acompanhar todos os momentos ao longo do trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) da UFRGS Guilherme Vargas Schirmer, pelo apoio durante a execução dos experimentos, pelas conversas, por nunca negar ajuda e sempre contribuir com novas descobertas para o trabalho.

À empresa GKN, pela doação das ferramentas de corte com geometria Prime® (suporte e insertos).

DELAVALD, A. A. **Investigação da rugosidade da superfície torneada do aço SAE 4140 utilizando ferramentas com geometrias Wiper® e Prime® através do projeto de experimentos Box-Behnken.** 2017. 20 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

O acabamento dado à peça nos processos de usinagem é uma das prioridades na indústria metal mecânica, visando aumentar a segurança, a vida e a confiabilidade do produto fabricado. Em geral, este acabamento é avaliado através de parâmetros de rugosidade. Neste trabalho, investigou-se o perfil e o parâmetro R_a (rugosidade média) das superfícies torneadas do aço SAE 4140 utilizando ferramentas com geometria Wiper® e Prime®. As combinações de parâmetros [velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)] em três níveis cada foram variadas aleatoriamente utilizando o projeto de experimentos Box-Behnken (BBD) para que se pudesse determinar a combinação ótima de parâmetros para cada ferramenta. Além disso, a Análise de Variância mostrou que somente o avanço tem influência significativa sobre os valores de rugosidade média para ambas as ferramentas. No entanto, a Wiper® apresentou rugosidades acima do esperado para o nível mais baixo de avanço provavelmente devido ao esmagamento do cavaco sobre a superfície usinada, pois o cavaco teve dificuldade de cisalhar e ser removido da zona de corte. Para os níveis utilizados, os menores valores registrados de rugosidade média foram $R_a = 0,48 \mu\text{m}$ (Wiper®) e $R_a = 0,93 \mu\text{m}$ (Prime®). Através do BBD, os parâmetros de corte ótimos obtidos visando atingir o menor valor de R_a foram: $v_c = 340 \text{ m/min}$, $f = 0,227 \text{ mm/rev.}$ e $a_p = 0,60 \text{ mm}$ (Wiper®); e $v_c = 280,4 \text{ m/min}$, $f = 0,15 \text{ mm/rev.}$ e $a_p = 0,60 \text{ mm}$ (Prime®).

PALAVRAS-CHAVE: Rugosidade, Ferramentas Wiper® e Prime®, Otimização de Parâmetros de Corte, Aço SAE 4140, Torneamento.

DELAVALD, A. A. **Investigation on surface roughness of SAE 4140 steel after turning with Wiper® and Prime® tool geometries through Box-Behnken Design**. 2017. 20 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The finishing in machining process is one of the priorities in the metalworking industry in order to increase the safety, life and reliability of the manufactured product. Usually, this finish is evaluated through roughness parameters. In this work, the roughness profile and parameter R_a of the machined surfaces of SAE 4140 steel after turning with Wiper® and Prime® tools were investigated. Cutting parameters combinations [cutting speed (v_c), feed-rate (f) and depth of cut (a_p)] at three levels each were randomly varied using the Box-Behnken Design (BBD) to determine the optimal combination of cutting parameters for each tool. In addition, the Analysis of Variance showed that only the feed-rate has significant influence on the R_a values for both tools. However, the Wiper tool presented roughness higher than expected for the lower level of feed-rate probably due to the chip crushing on machined surface, since the chip had difficulty to shear and leave the cutting zone. Considering the levels used, the lowest measured values of average roughness were $R_a = 0.48 \mu\text{m}$ (Wiper®) e $R_a = 0.93 \mu\text{m}$ (Prime®). Through the BBD, the optimum cutting parameters were defined aiming to reach the lowest R_a value: $v_c = 340 \text{ m/min}$, $f = 0.227 \text{ mm/rev.}$ e $a_p = 0.60 \text{ mm}$ (Wiper®); e $v_c = 280.4 \text{ m/min}$, $f = 0.15 \text{ mm/rev.}$ e $a_p = 0.60 \text{ mm}$ (Prime®).

KEYWORDS: Surface Roughness, Wiper® and Prime® tools, Cutting Parameters Optimization, SAE 4140 Steel, Turning.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	2
3	Revisão Bibliográfica	2
3.1	Rugosidade da Superfície Usinada	2
3.2	Ferramentas Wiper®	3
3.3	Ferramenta Prime®	3
3.4	Projeto de Experimentos Box-Behnken	4
3.5	Análise de Variância (ANOVA)	5
4	MATERIAIS E MÉTODOS	5
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	7
5.1	Ferramenta Wiper®	7
5.2	Ferramenta Prime®	10
6	CONCLUSÕES.....	12
	REFERÊNCIAS.....	13

1 INTRODUÇÃO

Ferraresi, 1977, define torneamento como um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. Em outras palavras, Machado et al., 2009, citam que torneamento é quando a peça gira em torno de seu eixo enquanto a ferramenta realiza os movimentos de avanço longitudinal e/ou transversal. Quanto à sua finalidade, o processo de torneamento pode ser classificado em operação de desbaste e operação de acabamento. Entende-se por acabamento a operação destinada a obter na peça as dimensões finais, ou um acabamento especificado, ou ambos. O desbaste é uma operação anterior à de acabamento que visa obter na peça forma e dimensões próximas das finais [Ferraresi, 1977]. No torneamento de acabamento, a qualidade final do componente é prioritária [Machado et al., 2009].

Mesquita, 1992, explica que o objetivo de um processo de usinagem é obter uma superfície técnica que apresente fatores superficiais (textura) e subsuperficiais (integridade) apropriados, a fim de garantir segurança, confiabilidade e longa vida ao componente fabricado.

Conforme Machado et al., 2009, a rugosidade da superfície depende de parâmetros como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta e da operação de usinagem. Ondulações e falhas devem ser evitadas na fabricação de uma superfície, já que representam erros de fabricação e aumentam a rugosidade média, que pode ser utilizada como parâmetro de saída para controlar o processo de usinagem.

O conceito de torneamento Wiper[®] é atingir uma alta qualidade no acabamento da superfície, utilizando o conceito de múltiplos raios em sua aresta de corte. Já o conceito Prime[®] propõe um novo conceito de torneamento, utilizando três arestas para cada canto do inserto e usinando em sentido reverso, desejando garantir maior produtividade para a indústria metal mecânica [Sandvik, 2017a]. Segundo recomendações da Sandvik, 2017b, o máximo valor permissível para o avanço (f_{max}) de uma ferramenta de corte convencional (geometria *standard*), como a Prime[®], em torneamento deve ser igual a 1/2 do raio de ponta da ferramenta (r_ϵ), ou seja, para $r_\epsilon = 0,8$ mm, deve-se ter $f_{max} \leq 0,4$ mm/volta. Entretanto, valores de avanço maiores que f_{max} podem ser aplicados na usinagem de materiais de corte fácil usando insertos com ângulos de ponta $\epsilon_r \geq 60^\circ$ e de posição $\chi_r < 90^\circ$ com velocidades de corte moderadas.

Com relação ao material empregado na fabricação por usinagem de componentes mecânicos de máquinas e equipamentos, o aço SAE 4140 é largamente empregado na produção de eixos, engrenagens, armas, bielas e virabrequins, os quais requerem boa resistência à fratura e à fadiga. O SAE 4140 possui médio percentual de carbono, é ligado ao Cr e ao Mo, e sua dureza varia de 55 HRC a 60 HRC quando temperado. Apresenta boa temperabilidade, boa forjabilidade e uma média usinabilidade [Favorit, 2013].

O Projeto de Experimentos (DOE – *Design of Experiments*) é fortemente apoiado em conceitos estatísticos com o intuito de otimizar o planejamento, a execução e a análise de um experimento. O uso permite que se estruture a sequência de ensaios de forma a traduzir os objetivos preestabelecidos. A eficiência é superior em termos de informação a qualquer outra sequência não estruturada de ensaios. A Metodologia de Superfície de Resposta (RSM – *Response Surface Methodology*) envolve uma série de técnicas orientadas à análise de experimentos planejados de modo a gerar informações suficientes para a modelagem das respostas de interesse através de superfícies n-dimensionais. Após a construção de modelos para a resposta, o interesse recai na busca do ajuste ótimo, ou seja, na busca de regiões que conduzam a um valor mínimo, máximo ou nominal, conforme a característica da resposta em questão [Ribeiro e ten Caten, 2000]. O Box-Behnken Design (BBD) é uma superfície de resposta que utiliza os fatores em 3 níveis (baixo, médio e alto) para modelar as respostas obtidas. É frequentemente usado, pois reduz o número de experimentos necessários em comparação aos experimentos fatoriais. Além disso, permite definir a relevância de cada fator, assim como avaliar a significância dos efeitos de interação entre eles [Ferreira et al., 2007]. Já a Análise de Variância (ANOVA) é utilizada quando é necessária a avaliação dos efeitos principais de cada fator (variável de entrada) e de suas combinações em uma resposta

(variável de saída), podendo ser utilizada para a definição da significância de cada fator e de suas interações em um processo de usinagem [Galdámez, 2002].

2 OBJETIVOS

Analisar a rugosidade média (R_a) da superfície gerada pelo torneamento a seco do aço SAE 4140 utilizando insertos com geometria Prime® e Wiper® através do projeto de experimentos Box-Behnken e da Análise de Variância.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Rugosidade da Superfície Usinada

A textura da superfície é composta por irregularidades finas ou erros microgeométricos que acontecem no processo de corte, podendo ser marcas de avanço, de aresta postiça de corte ou de desgaste da ferramenta [Machado et al., 2009].

O parâmetro comumente utilizado para avaliar quantitativamente a textura da superfície é a rugosidade média (R_a) que, segundo a NBR ISO 4287, 2005, é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem. Em geral, uma superfície com um bom acabamento apresenta baixos valores de R_a , e vice-versa. A Figura 3.1 representa esquematicamente o parâmetro R_a .

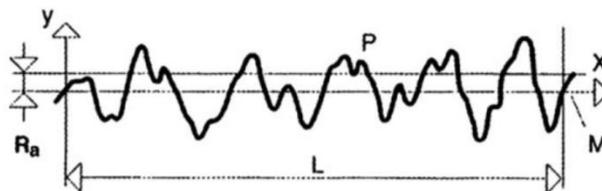


Figura 3.1 – Rugosidade média (R_a) de um perfil de superfície P em um comprimento de medição L [Kopač e Bahor, 1999].

Segundo Machado et al., 2009, a rugosidade sofre influência de vários parâmetros de usinagem, incluindo a geometria da ferramenta de corte, a geometria da peça, a rigidez da máquina-ferramenta, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta. Além disso, a rugosidade média (R_a) em torneamento com ferramenta de corte com geometria convencional (*standard*) pode ser estimada em função do avanço (f) e do raio de ponta da ferramenta (r_ϵ) através da Equação (3.1).

$$R_a[\mu\text{m}] = \frac{1000 \cdot f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_\epsilon} = 32,075 \frac{f^2}{r_\epsilon} \quad (3.1)$$

As condições de corte exercem grande influência sobre a rugosidade, sendo que o avanço o que produz maior efeito devido a uma maior contribuição geométrica. A altura dos picos e a profundidade de vales tendem a aumentar em proporção quadrática com o avanço [Machado et al., 2009].

Em geral, um maior raio de ponta (r_ϵ) gera um pior acabamento devido a um maior atrito e maior vibração (maior área de contato ferramenta-peça). Por isso, recomenda-se que o avanço (f) seja menor que 1/2 do raio de ponta da ferramenta (r_ϵ) e que a profundidade de corte (a_p) seja maior ou igual a 2/3 de r_ϵ [Sandvik, 2017b].

A rugosidade média (R_a) mantém-se praticamente estável para valores de velocidade de corte (v_c) acima daqueles onde se forma aresta postiça de corte [Ferraresi, 1977]. No

entanto, R_a pode sofrer oscilações devido à vibração do sistema máquina-ferramenta-peça que, dependendo do valor de v_c , podem ser grandes ou pequenas, dependendo da rigidez do sistema [Machado et al., 2009].

Os trabalhos de Mello et al., 2012, Souza et al., 2013, e Geier e Souza, 2014, já se propuseram a discutir a obtenção de rugosidades médias (R_a) para o aço SAE 4140.

3.2 Ferramentas Wiper®

As ferramentas de corte com geometria alisadora (Wiper®) oferecem uma solução que não segue a relação convencional entre avanço (f), raio de ponta (r_ϵ) e rugosidade média (R_a). A Wiper® permite um aumento da taxa de remoção de material em até 4x utilizando o dobro do avanço e o dobro da profundidade de corte mantendo-se a mesma rugosidade que seria gerada por uma ferramenta convencional [Geier et al., 2011; Izquierdo et al., 2013; Mello et al., 2012; Rosa e Souza, 2014; Souza et al., 2013].

O que difere a geometria Wiper® da *standard* é a existência de três ou mais raios de ponta (r_ϵ), permitindo que os picos da superfície gerada, que seriam deixados para trás em função da utilização da geometria convencional, sejam eliminados, proporcionando ganho produtivo com qualidade superficial superior [Sandvik, 2017b]. A Figura 3.2 ilustra como o raio de ponta modificado afeta a rugosidade.

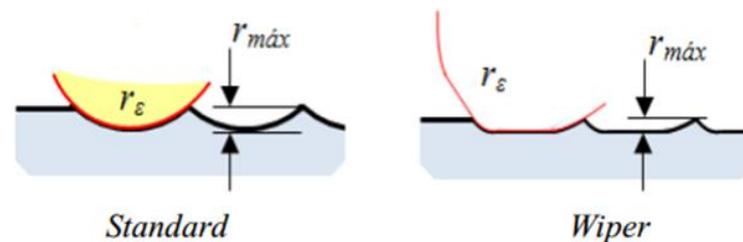


Figura 3.2 – Comparação entre as geometrias standard e Wiper® [Mello, et al., 2012]

Segundo Souza et al., 2016, quando a ferramenta alisadora é aplicada em baixos avanços de corte na usinagem de materiais dúcteis, valores de R_a maiores que os esperados são encontrados, possivelmente pela dificuldade de quebra e saída de cavacos e o conseqüente esmagamento destes sobre a superfície usinada, contrariando a concepção da geração de baixos valores de R_a por alisamento dos picos que a ferramenta Wiper® propõe.

Mello et al., 2012, e Geier e Souza, 2014, determinaram empiricamente as Equações (3.2) e (3.3), respectivamente, para estimar a rugosidade média das superfícies torneadas com a ferramenta Wiper®.

$$R_a [\mu\text{m}] = 0,52 + 3,56 \cdot \left(\frac{f}{r_\epsilon} \right)^{2,12} \quad (3.2)$$

$$R_a [\mu\text{m}] = 0,25 \cdot r_\epsilon + 0,06 \cdot e^{\left(6,8 \cdot f + \frac{0,68}{r_\epsilon} \right)} \quad (3.3)$$

3.3 Ferramenta Prime®

O sentido de corte convencional no torneamento longitudinal externo envolve o deslocamento da ferramenta do contraponto (ou final da peça) até a placa do torno. Essa definição precisou ser mudada com a nova tecnologia desenvolvida pela Sandvik Coromant. A ferramenta com geometria Prime® foi concebida de maneira que o torneamento possa ser feito em todas as direções de corte, permitindo que a peça seja usinada também da placa até o seu fim. A Figura 3.3 demonstra o sentido longitudinal reverso que a Prime® é capaz de torneare.

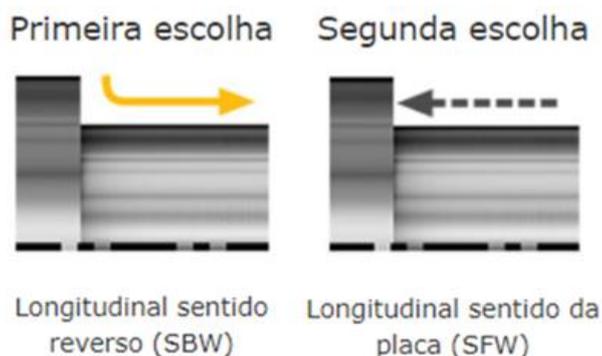


Figura 3.3 – Demonstração do sentido longitudinal reverso de corte como primeira escolha da ferramenta Prime® em relação ao sentido convencional [Sandvik, 2017b].

Observando a Figura 3.3, identifica-se que a geometria Prime® possibilita que não só a aresta principal seja usada, mas também a aresta secundária, gerando maior flexibilidade para usinar em todas as direções com maior taxa de remoção de material e maior vida de ferramenta [Sandvik, 2017a]. Com isso, a produtividade com o sentido de corte reverso pode chegar a mais de 50% se comparado ao sentido convencional, já que o inserto com geometria Prime® também possui um ângulo de posição pequeno, ângulo de ataque maior e uma utilização mais eficiente por ter três arestas por canto (uma para cada operação: torneamento longitudinal, faceamento e perfilamento). Essas características geram cavacos helicoidais finos e largos e uma distribuição de desgaste ao longo de cada canto do inserto, afastando o calor da zona de corte e permitindo usinar com parâmetros de corte mais altos [Sandvik, 2017a]. Para complementar, Ferraresi, 1977, e Machado et al., 2009, citam que, dentre as quatro classificações de cavaco (em fita, helicoidal, espiral e em lascas), a helicoidal é a mais conveniente para a usinagem.

Essa aplicação será especialmente vantajosa para indústrias de fabricação por usinagem como a aeroespacial e automotiva, em que é preciso realizar operações de torneamento externo em grandes lotes, ou quando forem necessárias várias trocas de ferramentas e vários *setups*.

3.4 Projeto de Experimentos Box-Behnken

A otimização dos parâmetros de corte em usinagem é de extrema importância para se praticar uma fabricação por usinagem mais eficiente, onde o processo pode ser mais rápido, econômico e que atenda às especificações da peça. O Box-Behnken Design (BBD) é um método de otimização estatística que visa trabalhar de forma simultânea na obtenção dos melhores níveis em um conjunto de fatores e a interação entre eles, que exerçam influência sobre determinado processo. Sua aplicação em processos de fabricação é bem definida e utilizada [Niharika et al., 2016, Baumgaertner Filho, 2017].

Em experimentos com três níveis (baixo, médio e alto), o BBD pode ser usado para a composição dos dados do projeto. Uma de suas vantagens em relação a projetos de experimentos fatoriais é a necessidade da realização de menos experimentos, alterando de 27 para apenas 15 amostras (12 + 3) em estudos com três fatores diferentes. Na Figura 3.4, está a explicação para essa diminuição, pois o BBD utiliza 12 amostras em pontos centrais e mais três no centro do cubo para realizar suas combinações, fazendo com que os vértices do cubo que simula as análises não sejam utilizados. Outra vantagem da sua utilização, é que os fatores não estão simultaneamente nos seus níveis altos e baixos, evitando experimentos sob condições extremas. Para a otimização de respostas, o BBD calcula a importância atribuída a cada um dos parâmetros e a importância dos efeitos das interações entre eles e determina o ponto onde se atinge a resposta mais satisfatória possível [Ferreira et al., 2007].

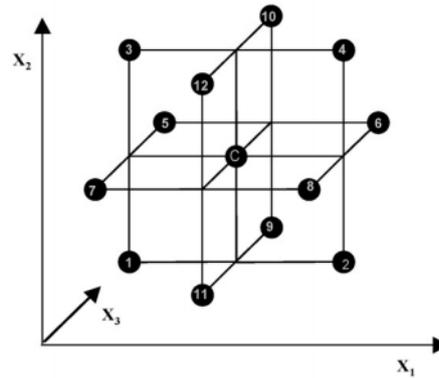


Figura 3.4 – Representação do BBD [Ferreira et al., 2007].

3.5 Análise de Variância (ANOVA)

Conforme Galdámez, 2002, a Análise de Variância é uma ferramenta estatística que avalia e determina os efeitos principais de cada fator envolvido no estudo, a média dos seus resultados, o efeito da interação entre os fatores e o erro experimental. Também pode ser utilizada para definir se os fatores são significativos e o quão significativo é para a resposta. O modelo estatístico é dado pela Equação (3.4),

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (3.4)$$

onde μ é a média dos resultados, α_i é o efeito principal do fator “A”, β_j é o efeito principal do fator “B”, $(\alpha\beta)_{ij}$ é o efeito da interação dos fatores “A” e “B”, e ε_{ijk} é o erro experimental.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental consistiu na realização do torneamento longitudinal externo a seco do aço SAE 4140 no torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II (Fig. 4.1), disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS), utilizando as ferramentas Wiper[®] e Prime[®] (Fig. 4.2).



Figura 4.1 – Torno CNC Mazak QTN 100-II

Ambas as ferramentas possuem raio de ponta $r_e = 0,8$ mm. A intenção era avaliar comparativamente a rugosidade gerada por ambas as ferramentas apresentando superfície alisadora. Mas como não foi possível dispor da Prime[®] com tal característica (CP-A1108 L5W), resolveu-se investigar separadamente o comportamento de ambas quanto à textura. Assim, a ferramenta Prime[®] utilizada não possui superfície alisadora e foi utilizada no sentido reverso (SBW), enquanto a Wiper[®] (com superfície alisadora) foi usada no sentido convencional.



Figura 4.2 – Insertos com geometria: (a) geometria Prime®; (b) geometria Wiper®

A composição química do aço SAE 4140 utilizado, conforme a norma SAE-J404 [Gerdau, 2003], está na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química do aço SAE 4140 [Gerdau, 2003]

%C	%Mn	%P (Máx)	%S (Máx)	%Si	%Cr	%Mo
0,38-0,43	0,75-1,00	0,030	0,040	0,15-0,35	0,80-1,10	0,15-0,25

As dimensões do corpo de prova foram definidas em função da quantidade de combinações necessárias para o BBD e com rebaiços maiores no começo do contraponto para que o suporte da ferramenta tivesse espaço para trabalhar. A Figura 4.3 mostra tais características geométricas do corpo de prova.

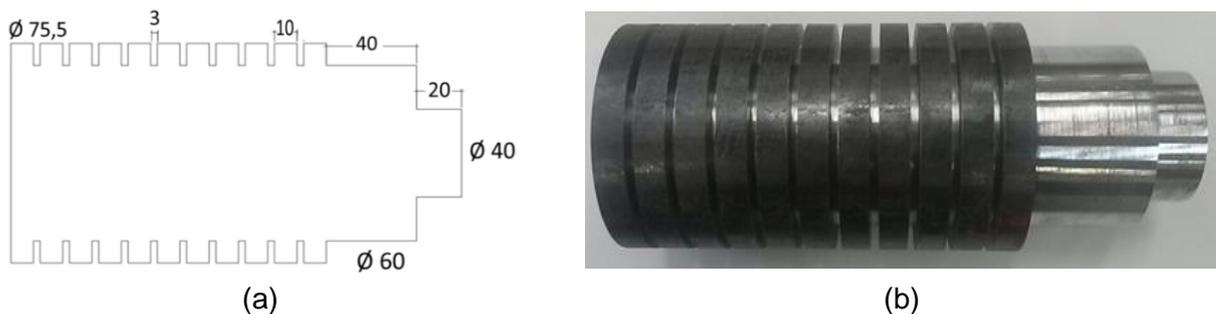


Figura 4.3 – Características geométricas do corpo de prova preparado para os experimentos: (a) desenho contendo as dimensões [mm]; (b) imagem da peça antes de ser usinada.

Posteriormente, a rugosidade média (R_a) da superfície usinada foi mensurada com o rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201P (Fig. 4.4a). Para garantir que o corpo de prova não ficasse descentralizado ao retirar e colocar novamente na máquina, as medições foram feitas in loco, i.e., dentro da máquina (Fig. 4.4b).

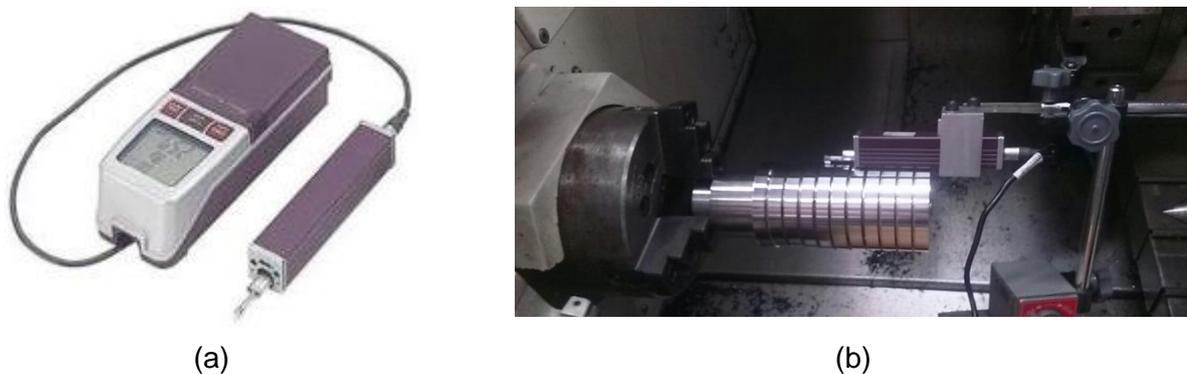


Figura 4.4 – Medição de rugosidade: (a) rugosímetro Mitutoyo SJ-201P; (b) operação de medição realizada dentro do torno.

Para ambas as ferramentas, três medições dos parâmetros de rugosidade foram realizadas em pontos equidistantes em 120° de cada amostra. Além do rugosímetro Mitutoyo SJ-201P, também foi utilizado o software dedicado SurfTest SJ Tools para auxiliar na geração do perfil de rugosidade de cada superfície. O comprimento de amostragem (*cut-off*) foi igual a 0,8 mm e o comprimento de medição $L = 5 \times 0,8 = 4$ mm em todas as medições. Os dados utilizados posteriormente foram as medidas de rugosidade média nos três pontos (R_{a1} , R_{a2} , R_{a3}) de medição de cada amostra.

Utilizando o BBD com três fatores, fez-se necessário obter 15 amostras para cada ferramenta, sendo três delas no ponto central. Com base nas especificações dos parâmetros de corte recomendadas pelo fabricante, os níveis escolhidos estão indicados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros escolhidos conforme os três níveis do BBD

BBD	-1	0	+1
v_c [m/min]	240	290	340
f [mm/volta]	0,15	0,30	0,45
a_p [mm]	0,60	1,30	2,00

No trabalho, as combinações de parâmetros [velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)] foram variadas aleatoriamente utilizando a função de criar um experimento de superfície de resposta (RSM) no software Minitab®18, a fim de obter valores de rugosidade média (R_a) distintos com ambas as ferramentas (Wiper® e Prime®).

Em seguida, valores ótimos de parâmetros foram determinados utilizando os dados das análises estatísticas do BBD e a importância de cada um definido com a ANOVA (ambos via Minitab®18), a fim de gerar o menor valor possível de R_a para as ferramentas Wiper® e Prime®.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ferramenta Wiper®

A Tabela 5.1 mostra os parâmetros de corte e os valores de rugosidade para cada amostra quando usinada com o inserto TNMX 160408-WF 2015.

Tabela 5.1 – Parâmetros de corte, rugosidades medidas nos três pontos de cada passe e a rugosidade média resultante para o inserto com geometria Wiper®.

Amostra	v_c (m/min)	f (mm/rev.)	a_p (mm)	R_{a1} (μm)	R_{a2} (μm)	R_{a3} (μm)	R_a (μm)
1w	290	0,30	1,3	0,95	0,91	0,88	$0,91 \pm 0,04$
2w	240	0,15	1,3	0,74	0,71	1,09	$0,85 \pm 0,24$
3w	340	0,15	1,3	0,52	0,71	0,99	$0,74 \pm 0,25$
4w	240	0,45	1,3	2,22	2,27	2,11	$2,20 \pm 0,09$
5w	340	0,45	1,3	2,04	1,83	1,77	$1,88 \pm 0,16$
6w	240	0,30	0,6	0,65	0,47	0,50	$0,54 \pm 0,11$
7w	340	0,30	0,6	0,48	0,48	0,48	0,48
8w	290	0,30	1,3	1,24	0,87	0,99	$1,03 \pm 0,21$
9w	240	0,30	2,0	0,98	0,90	1,25	$1,04 \pm 0,21$
10w	340	0,30	2,0	1,06	0,97	1,15	$1,06 \pm 0,09$
11w	290	0,15	0,6	0,95	0,73	0,53	$0,74 \pm 0,21$
12w	290	0,45	0,6	2,03	2,39	2,47	$2,30 \pm 0,27$
13w	290	0,15	2,0	1,31	1,41	0,85	$1,19 \pm 0,34$
14w	290	0,45	2,0	1,94	1,84	1,52	$1,77 \pm 0,25$
15w	290	0,30	1,3	0,92	1,15	1,28	$1,12 \pm 0,20$

A menor rugosidade média foi encontrada na amostra 7w ($R_a = 0,48 \mu\text{m}$) e a maior na amostra 12w ($R_a = 2,30 \pm 0,27 \mu\text{m}$). Os perfis gerados pela ferramenta Wiper® para ambas as amostras podem ser vistos nas Figuras 5.1 e 5.2, respectivamente. Observa-se nos perfis gerados que o avanço é equivalente à distância entre picos, e quanto maior essa distância, maiores os picos e os vales gerados, demonstrando a importância do avanço por volta no perfil da rugosidade. Além disso, o perfil é caracterizado pela marca deixada pela ponta da ferramenta [Machado et al., 2009]. Ambos os perfis não apresentam picos ou vales destoantes, mostrando que não há rebarbas ou riscos significantes nesses perfis.

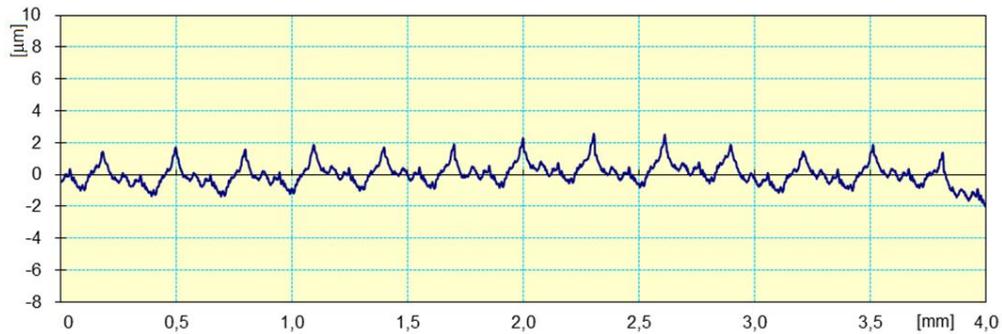


Figura 5.1 – Perfil de rugosidade da amostra 7w ($v_c = 340 \text{ m/min}$; $f = 0,30 \text{ mm/rev.}$; $a_p = 0,6 \text{ mm}$)

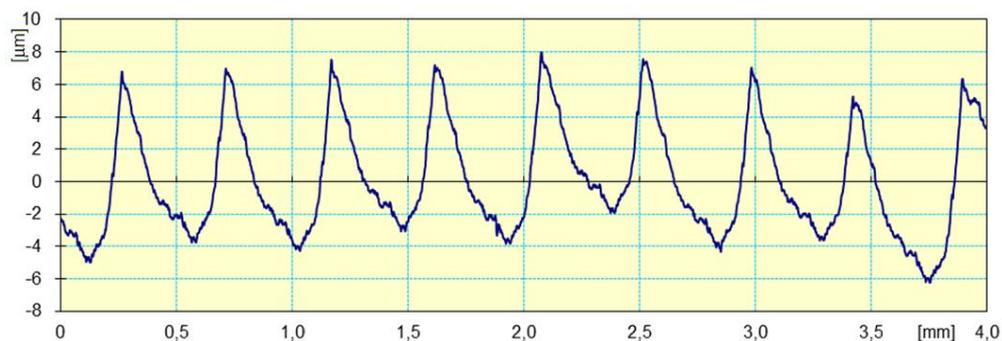


Figura 5.2 – Perfil de rugosidade da amostra 12w ($v_c = 290 \text{ m/min}$; $f = 0,45 \text{ mm/rev.}$; $a_p = 0,6 \text{ mm}$)

A menor rugosidade não coincidiu com a aplicação do menor avanço. Para exemplificar, a Figura 5.3 representa o perfil de rugosidade da amostra 2w, gerado com $v_c = 240 \text{ m/min}$, $f = 0,15 \text{ mm/rev.}$ e $a_p = 1,3 \text{ mm}$. Nesse perfil observam-se irregularidades que resultaram em um valor de rugosidade média maior que o esperado ($R_a = 0,85 \pm 0,24 \mu\text{m}$). Os picos possivelmente indicam a existência de rebarbas, e os vales a presença de riscos na peça; tais perturbações podem ter sido geradas pelo esmagamento dos cavacos que tiveram dificuldade de cisalhar, quebrar e sair da área de corte, prejudicando o acabamento [Souza et al., 2016].

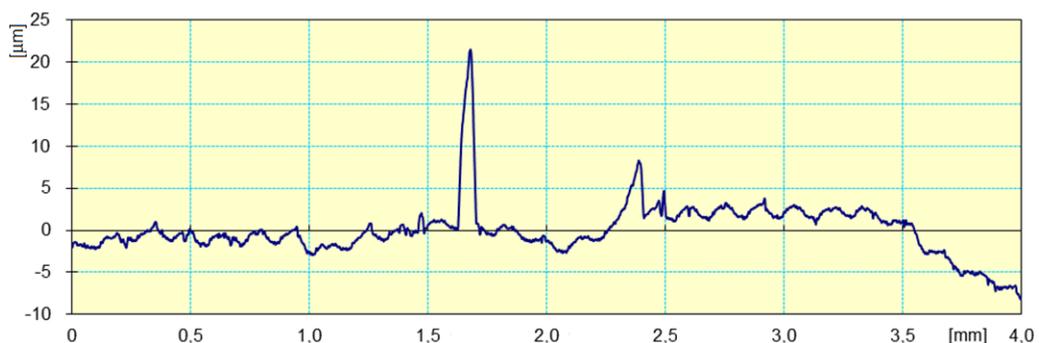


Figura 5.3 – Perfil de rugosidade da amostra 2w ($v_c = 240 \text{ m/min}$; $f = 0,15 \text{ mm/rev.}$; $a_p = 1,3 \text{ mm}$) com perceptíveis sinais de rebarbas e riscos que prejudicam o acabamento.

Utilizando o BBD, gráficos de contorno para o nível central de cada um dos três parâmetros (v_c , f e a_p) utilizados com a ferramenta Wiper® foram construídos (Fig. 5.4).

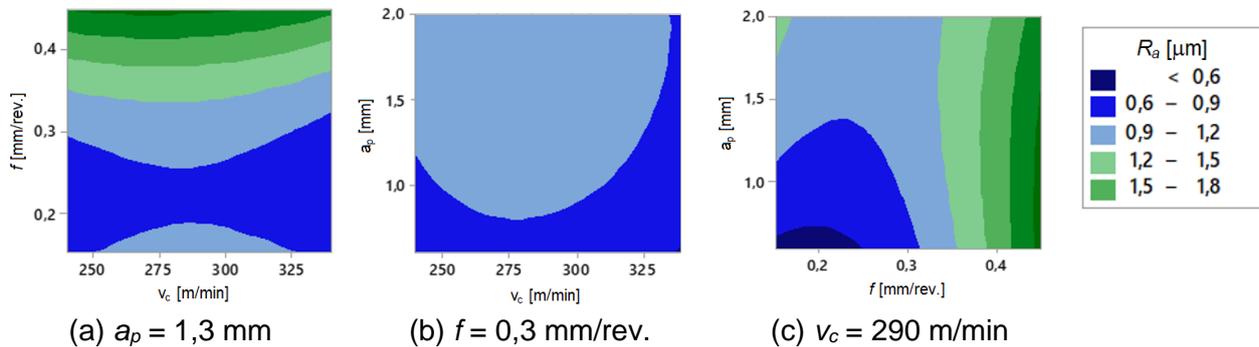


Figura 5.4 – Gráficos de contorno do valor médio de R_a para a geometria Wiper®.

A Fig. 5.4a e a Fig. 5.4c mostram que a rugosidade média (R_a) tende a aumentar com o incremento do avanço. Já a Fig. 5.4b e a Fig. 5.4c indicam que a profundidade de corte (a_p) não tem influência significativa sobre R_a . As Fig. 5.4a e a Fig. 5.4b sugerem uma pequena diferença em R_a quando a velocidade de corte (v_c) é variada, já que as velocidades de corte utilizadas para os experimentos estão acima de 100 m/min, não existem condições favoráveis para que este parâmetro tenha significância na rugosidade média do material [Ferraresi, 1977].

Para comprovar os dados anteriores e saber se a influência dos parâmetros e suas combinações é significativa, foi realizada a ANOVA. A Tabela 5.2 indica os resultados. O intervalo de confiança utilizado foi de 95%, admitindo-se que valores-p menores que 0,05 não são significativos na resposta. Vale ressaltar que quanto menor foi o valor de valor-p, maior será o percentual de influência do parâmetro na resposta.

Tabela 5.2 – ANOVA para valores de R_a utilizando a ferramenta Wiper®.

Fator	SQ	GL	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)
v_c	0,1277	2	0,0614	1,03	0,467	2,74
F	3,8214	2	1,9107	31,98	0,001	82,17
a_p	0,1501	2	0,0750	1,26	0,153	3,22
$v_c \times f$	0,0113	1	0,0113	0,25	0,635	0,24
$v_c \times a_p$	0,0014	1	0,0014	0,03	0,863	0,03
$f \times a_p$	0,2417	1	0,2417	5,41	0,068	5,19
Erro	0,2233	8	0,0597			
Total	4,6508	14				

SQ: soma dos quadrados **MQ:** média quadrada **GL:** graus de liberdade **F:** valor F calculado.

Conforme Tabela 5.2, tem-se a pequena influência da velocidade de corte (v_c) e da profundidade de corte (a_p) sobre os valores médios de R_a . Ao mesmo tempo, indica a importância do avanço (f), que contribui em 82,17% R_a . A interação dos fatores entre o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p) também se mostrou parcialmente significativa (um número maior de amostras poderia reduzir o valor-p), sendo igual a 5,19% na contribuição.

A Figura 5.5 apresenta os gráficos dos efeitos principais, indicando a pequena influência da velocidade de corte (v_c) e da profundidade de corte (a_p), ao mesmo tempo que indica a variação encontrada no nível mais baixo do avanço (f), quando o valor de R_a é levemente maior comparado ao nível médio.

A partir dos níveis avaliados com o BBD e apresentados na Figura 5.5, é possível minimizar a rugosidade média (R_a) para a ferramenta Wiper® com os seguintes parâmetros de corte: $v_c = 340$ m/min (máximo); $f = 0,226$ mm/rev. (intermediário); $a_p = 0,60$ mm (mínimo).

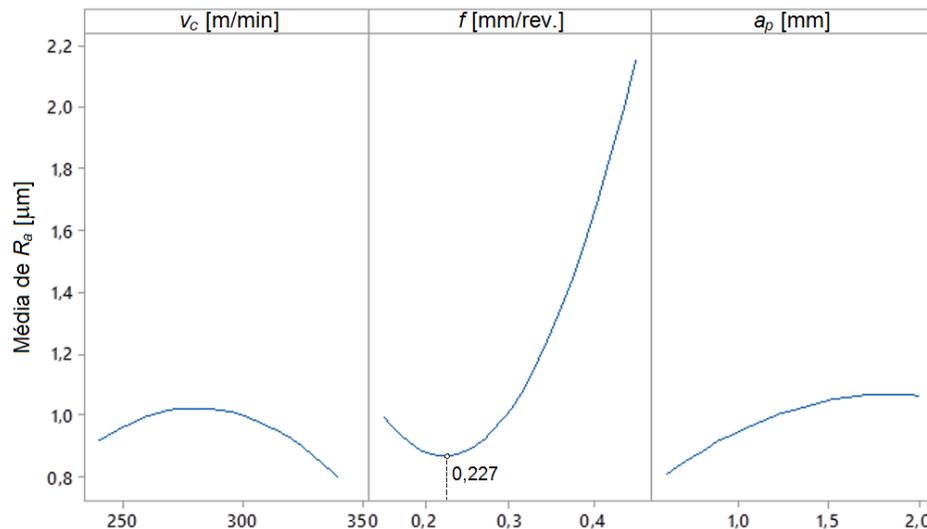


Figura 5.5 – Gráficos dos efeitos principais com ferramenta Wiper[®] sobre o valor médio de R_a .

5.2 Ferramenta Prime[®]

A Tabela 5.3 mostra os parâmetros de corte e os valores de rugosidade para cada amostra quando usinado com o inserto CP-A1108 L5 4325.

Tabela 5.3 – Parâmetros de corte, rugosidades medidas nos três pontos de cada passe e a rugosidade média resultante para o inserto com geometria Prime[®].

Amostra	v_c (m/min)	f (mm/rev.)	a_p (mm)	R_{a1} (μm)	R_{a2} (μm)	R_{a3} (μm)	R_a (μm)
1p	290	0,30	1,3	4,36	4,04	3,75	$4,05 \pm 0,31$
2p	240	0,15	1,3	0,95	0,89	1,16	$1,00 \pm 0,16$
3p	340	0,15	1,3	0,95	0,92	0,91	$0,93 \pm 0,02$
4p	240	0,45	1,3	6,99	7,09	6,99	$7,02 \pm 0,07$
5p	340	0,45	1,3	7,60	7,63	7,74	$7,66 \pm 0,08$
6p	240	0,30	0,6	3,59	3,70	3,60	$3,63 \pm 0,07$
7p	340	0,30	0,6	3,63	3,73	3,76	$3,71 \pm 0,08$
8p	290	0,30	1,3	2,89	2,82	2,86	$2,86 \pm 0,04$
9p	240	0,30	2,0	4,14	4,14	4,15	$4,14 \pm 0,01$
10p	340	0,30	2,0	5,75	5,84	5,88	$5,82 \pm 0,07$
11p	290	0,15	0,6	1,33	1,31	0,95	$1,20 \pm 0,25$
12p	290	0,45	0,6	6,76	6,28	6,40	$6,48 \pm 0,28$
13p	290	0,15	2,0	1,38	1,38	1,34	$1,37 \pm 0,03$
14p	290	0,45	2,0	5,12	5,11	4,99	$5,07 \pm 0,08$
15p	290	0,30	1,3	4,17	3,84	4,12	$4,04 \pm 0,20$

A ferramenta Prime[®] utilizada não possui a geometria alisadora na sua aresta de corte. Portanto, ela deve se comportar como uma ferramenta com geometria convencional quando se avalia a rugosidade média gerada. Vale salientar que a grande vantagem da Prime[®] é o corte no sentido reverso (SBW).

Sobre os perfis da superfície, a menor rugosidade média foi encontrada na amostra 3p ($R_a = 0,93 \pm 0,02 \mu\text{m}$) e a maior na amostra 5p ($R_a = 7,66 \pm 0,08 \mu\text{m}$). Os parâmetros das duas diferem apenas no avanço (f), evidenciando a sua influência no acabamento final da peça. Os perfis de rugosidade gerados pela ferramenta Prime[®] para as amostras 3p e 5p podem ser vistos nas Figuras 5.6 e 5.7, respectivamente.

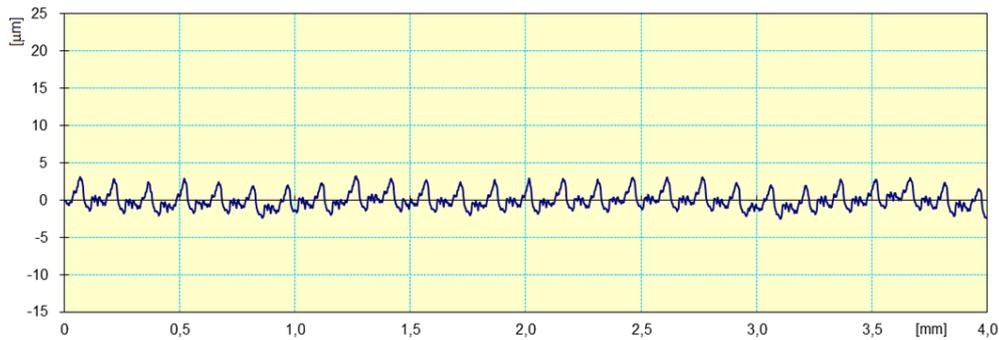


Figura 5.6 – Perfil de rugosidade da amostra 3p ($v_c = 340$ m/min; $f = 0,15$ mm/rev.; $a_p = 1,3$ mm)

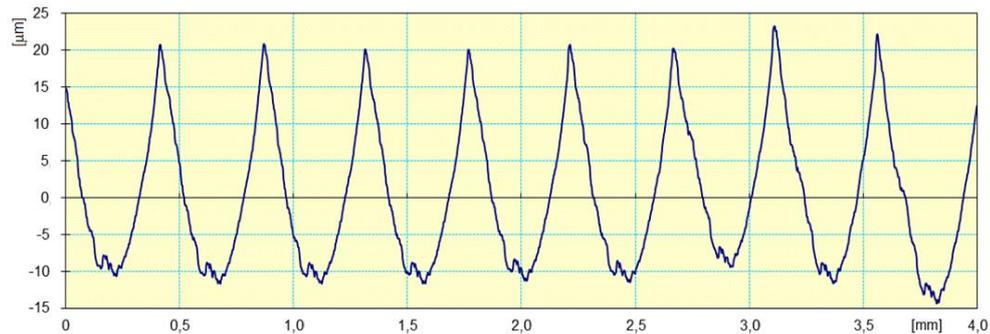


Figura 5.7 – Perfil de rugosidade da amostra 5p ($v_c = 340$ m/min; $f = 0,45$ mm/rev.; $a_p = 1,3$ mm)

Ao analisar e comparar os perfis da Fig. 5.6 e Fig. 5.7, nota-se que os avanços (f) de ambas têm o valor muito próximo à distância entre picos e que, quanto maior o avanço usado, mais altos são os picos e mais profundos são os vales no perfil de rugosidade. Assim, pode-se perceber claramente a influência do avanço no acabamento da superfície. Os dois perfis não apresentam picos ou vales que diferem do resto do perfil, evidenciando que não existem rebarbas ou riscos significantes nas amostras.

Utilizando o BBD, gráficos de contorno para o nível central de cada um dos três parâmetros (v_c , f e a_p) utilizados com a ferramenta Prime[®] foram construídos (Fig. 5.8).

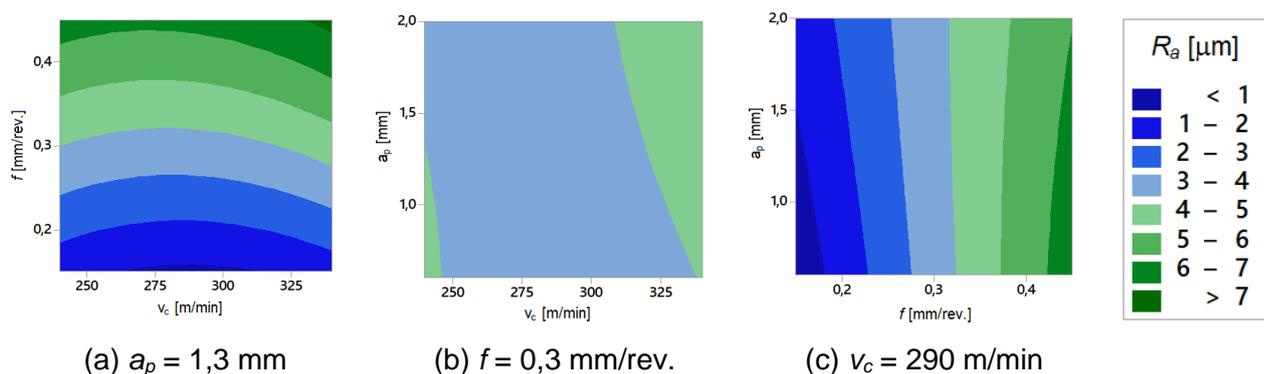


Figura 5.8 – Gráficos de contorno do valor médio de R_a para a geometria Prime[®].

A Fig. 5.8a e a Fig. 5.8c revelam resultados similares aos obtidos com a ferramenta Wiper[®], ou seja, a rugosidade média (R_a) aumenta com o incremento do avanço. Os gráficos indicam também que a profundidade de corte (a_p) e a velocidade de corte (v_c) não apresentam influências significativas sobre R_a . Para comprovar isso, foi realizada a ANOVA. A Tabela 5.4 mostra os resultados, indicando uma contribuição de 89,17% do avanço sobre R_a .

A partir da Figura 5.8 e os seus três gráficos, as conclusões são semelhantes às da ferramenta Wiper[®], mostrando que o avanço é o principal influenciador na rugosidade. As

análises feitas são corroboradas pela Figura 5.9, que evidencia o efeito de cada um dos parâmetros para o valor de R_a .

Tabela 5.4 – ANOVA para valores de R_a utilizando a ferramenta Prime®.

Fator	SQ	GL	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)
v_c	0,4232	2	0,2116	0,50	0,510	0,63
F	59,0966	2	29,5483	70,09	4E-4	89,17
a_p	0,1050	2	0,0525	0,12	0,739	0,16
$v_c \times f$	0,1248	1	0,1248	0,15	0,716	0,19
$v_c \times a_p$	0,3173	1	0,3173	0,38	0,566	0,48
$f \times a_p$	0,6215	1	0,6215	0,74	0,430	0,93
Erro	4,2157	8	0,8431			6,36
Total	66,2713	14				

SQ: soma dos quadrados **MQ:** média quadrada **GL:** graus de liberdade **F:** valor F calculado.

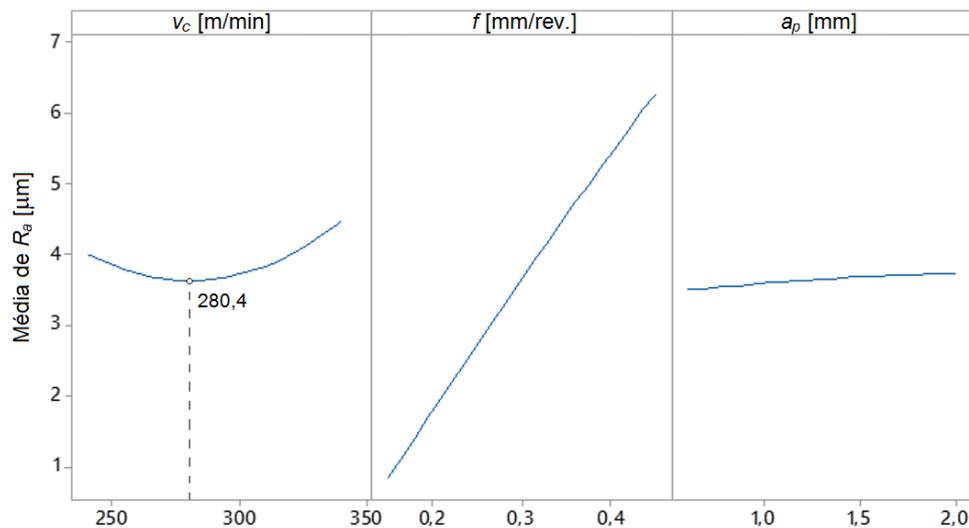


Figura 5.9 – Gráficos dos efeitos principais com ferramenta Prime® sobre o valor médio de R_a .

A partir dos níveis avaliados com o BBD e apresentados na Figura 5.9, é possível minimizar a rugosidade média (R_a) para a ferramenta Prime® com os seguintes parâmetros de corte: $v_c = 280,4$ m/min (intermediário); $f = 0,15$ mm/rev. (mínimo); $a_p = 0,60$ mm (mínimo).

6 CONCLUSÕES

Utilizando a Análise de Variância (ANOVA) para analisar os dados coletados sobre o perfil de rugosidade da superfície torneada gerada no aço SAE 4140 pelas ferramentas Wiper® e Prime®, foi possível afirmar que, conforme esperado, o avanço por volta (f) é o parâmetro mais importante para a definição da rugosidade média (R_a). A ANOVA determinou as significâncias de cada parâmetro e de suas combinações, definindo a importância do avanço por volta (f) em 82,17% para a geometria Wiper® e em 89,17% para a geometria Prime®.

Pôde-se confirmar também a grande importância da geometria alisadora da ferramenta Wiper® na geração de superfícies com baixos valores de rugosidade. Os resultados mostraram que, quando analisados os menores valores médios de R_a , a ferramenta Wiper® alcançou uma rugosidade 48% menor que a Prime®; e considerando os maiores valores médios de R_a , a redução é ainda maior (70%).

Para a geometria Wiper[®], foi comprovada a já conhecida dificuldade do inserto com múltiplos raios de toronar em baixos avanços por volta, resultando em rugosidades médias mais altas do que a esperada para a ferramenta, que tem como seu maior objetivo um bom acabamento. A provável causa é o esmagamento de cavacos que não conseguem cisalhar devido ao baixo avanço e, conseqüentemente, sair da zona de corte, fazendo com que apareçam riscos e rebarbas no perfil da superfície gerada.

A geometria Prime[®] sem a propriedade alisadora mostrou valores de rugosidade condizentes com os insertos com geometrias convencionais; entretanto, apresenta a vantagem de se realizar a usinagem no sentido reverso. Portanto, a comparação entre as duas ferramentas em relação aos valores de R_a não é pertinente, já que não é a principal proposta dessa geometria.

Através do Projeto de Experimentos Box-Behnken (BBD), os parâmetros de corte ótimos para torneamento do aço SAE 4140 para cada ferramenta foram definidos visando atingir o menor valor de R_a : $v_c = 340$ m/min, $f = 0,227$ mm/rev. e $a_p = 0,60$ mm para a geometria Wiper[®]; e $v_c = 280,4$ m/min, $f = 0,150$ mm/rev. e $a_p = 0,60$ mm para a geometria Prime[®].

Este trabalho mostrou a importância do conhecimento estatístico para aplicações industriais, pois demonstra que o BBD e a ANOVA são ferramentas úteis e, acima de tudo, céleres para se utilizar na otimização de fatores com diversos níveis de resposta para usinagem e quaisquer outras áreas em que exista a aplicabilidade.

Para operações de acabamento, já existe um inserto que une as duas tecnologias testadas, podendo ser utilizado no sentido reverso (SBW) e com geometria alisadora (CP-A1108 L5W 4325); entretanto essa ferramenta não foi disponibilizada pelo fornecedor para testes. Em futuros trabalhos, essa comparação pode ser feita a fim de comprovar os ganhos produtivos e de qualidade no torneamento a seco do aço SAE 4140.

REFERÊNCIAS

Baumgaertner Filho, A. J., 2017, “**Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento**”, Dissertação (mestrado) em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, RS, 91 p.

Favorit Aços Especiais, 2013, “**Catálogo Técnico Favorit**”, Disponível em: <http://www.favorit.com.br/sites/default/files/favorit-catalogo-2013.pdf>. Acesso em: 01 de dezembro de 2017

Ferraresi, D., 1977, “**Fundamentos da Usinagem dos Metais**”, Ed. Edgar Blücher, São Paulo, 800 p.

Ferreira S.L.C, Bruns R. E., Silva E. G. P. da, Santos W. N. L. dos Quintella C. M.m David J. M., Andrade J. B. de, Breikreitz M. C., Jaridm I. C. S. F., Neto B. B. “**Statistical designs and response surface techniques for the optimization of chromatographic systems**”, 2007. Journal of Chromatography A , Vol. 1158 , No. 1-2, pp. 2-14

Galdámez, E. V. C., 2002, “**Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**”, Dissertação (mestrado) em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, USP, SP, 133 p.

Geier, M., Mello, M. S., Souza, A. J., 2011, “**Comparação entre ferramenta alisadora e ferramenta convencional no torneamento de acabamento para aços baixo carbono e baixa liga**”, 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 11 Abr - 15 Abr, Caxias do Sul, RS.

Geier, M.; Souza, A. J., 2014, “**Empirical determination of roughness parameters using wiper tool inserts in finish turning of AISI 4140**”, Advanced Materials Research, vol. 845, p. 929-933

Gerdau, 2003, **“Manual de Aços”**, Gerdau Aços Finos Piratini. Disponível em: http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf. Acesso em: 21 de outubro de 2017

Izquierdo, R. C., da Rosa, G. C., Colpes, K. M., Souza, A. J., Pasa, G. S., Hubler, R., Vargas, A. L. M. V., 2013 **“Análise comparativa das ferramentas alisadora e convencional no torneamento de acabamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 420”**, 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 15 Abr - 19 Abr, Itatiaia, RJ

Kopač, J., Bahor, M., 1999, **“Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product”**, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 92-93, No. 30, pp. 381-387.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., da Silva, M. B., 2009, **“Teoria da Usinagem dos Materiais”**, Edgard Blücher, São Paulo, 371 p

Mello, M. S., Souza, A. J., Geier, M., 2012, **“Determinação empírica dos parâmetros de rugosidade Ra e Rt aplicando ferramenta alisadora no torneamento a seco de acabamento do aço AISI 4140”**, 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VII CONEM), 31 Jul - 03 Ago., São Luís, MA.

Mesquita, N.G.M., 1992, **“Avaliação e Escolha de Uma Superfície Segundo sua Função e Fabricação”**. Tese de Doutorado, POSMEC, UFSC, Florianópolis, 142p.

NBR ISO 4287, 2005, **“Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade”**, International Organization for Standardization, 18p.

Niharika, B.P, Agrawal, I.A.K., Khan, Z.A., 2016, **“Effects of cutting parameters on quality of surface produced by machining of titanium alloy and their optimization”** Archive of Mechanical Engineering, vol. 63, n. 4, p. 531-548.

Ribeiro, J. L. D.; Ten Caten, C. S., 2000, **“Projeto de Experimentos”**. Série Monográfica Qualidade. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, 153 p. Disponível em: http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/117_apostila_pe_2011.pdf.

Rosa, G. C., Souza, A. J., 2014, **“Estudo comparativo das ferramentas alisadora e convencional através das forças e rugosidades resultantes do processo de torneamento de acabamento do aço inoxidável AISI 420C”**, VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 10 Ago – 15 Ago, Uberlândia, MG.

Sandvik, 2017a, **“Turning Handbook”**, Sandvik Coromant, 51 p.

Sandvik, 2017b, **“Turning Tools, Part A: General Turning”**, Sandvik Coromant, 285 p.

Souza, A. J., Azambuja, A. S., Mello, M. S., da Rosa, G. C., 2013, **“Análise comparativa da vida das ferramentas de corte alisadora (wiper) e convencional (standard) no torneamento de acabamento do aço SAE 4140”**, 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 15 Abr - 19 Abr, Itatiaia, RJ

Souza, A. J., Pieres, A., Klahr, B., Buseti, G. B., Rosa, G. C., 2016, **“Avaliação do acabamento gerado no torneamento do aço AISI 420C com ferramenta Wiper para diferentes avanços e profundidades de corte”**, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 21 Ago – 25 Ago, Fortaleza, CE.