

AVALIAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE USINAGEM NO FRESAMENTO DE SUPERFÍCIES INCLINADAS COM FRESAS ESFÉRICAS

Gabriel Habitzreuter

Luiz Carlos Santana de Freitas

Denis Boing

UNIFEFE – Centro Universitário de Brusque, Rua Dorval Luz, 123 – Santa Terezinha – CEP: 88352-400 – Brusque/SC – Cx. Postal: 1501

gabriel.h@unifebe.edu.br, luizcsdefreitas@unifebe.edu.br, denisboing@unifebe.edu.br

Resumo. A complexidade geométrica dos produtos fabricados por injeção impacta em desafios na usinagem dos moldes e matrizes, especialmente em relação às áreas de difícil acesso, elevado comprimento em balanço da ferramenta e a constante variação do ponto de contato entre a ferramenta de corte e a peça. Neste contexto, este estudo aborda o fresamento de superfícies inclinadas (15°) no aço VP Atlas com dureza de 40 HRC, utilizando fresas esféricas com $\varnothing 6$ mm. Foi avaliado o impacto das estratégias de usinagem ascendente e descendente no acabamento da superfície, na topografia gerada e no desgaste da ferramenta. A estratégia de corte ascendente proporcionou uma superfície inclinada com menor valor de rugosidade, $S_a = 0,76 \mu\text{m}$ quando comparada a estratégia descendente $S_a = 3,79 \mu\text{m}$. A topografia da superfície gerada pela usinagem ascendente é periódica e formada pela cinemática da operação (f e a_e), enquanto que a estratégia descendente proporcionou uma superfície aperiódica. A estratégia ascendente proporcionou menor desgaste da ferramenta ($VB_B = 58 \mu\text{m}$ e $W_{MD} = 27 \mu\text{m}$) comparada a estratégia descendente ($VB_B = 81 \mu\text{m}$ e $W_{MD} = 33 \mu\text{m}$).

Palavras chave: Fresamento. Estratégias de usinagem. Rugosidade. Topografia. Desgaste de ferramenta.

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de peças industriais com grau de complexidade elevado, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos e novas tecnologias para a manufatura de moldes e matrizes. Para a fabricação de um molde, segue-se comumente à seguinte sequência: desbaste, pré-acabamento, acabamento e polimento. Geralmente utiliza-se do processo de fresamento para realizar a operação de desbaste, as quais consistem, comumente, em estratégias de usinagem por camadas sendo também denominada como desbaste em $2 \frac{1}{2}$ eixos. As operações de pré-acabamento têm a finalidade de eliminar grandes volumes de material deixados pelo desbaste, geralmente em áreas onde a ferramenta de desbaste é incapaz de alcançar devido às limitações geométricas (Bonetti, 2008 e Souza, 2004).

As operações de acabamento são empregadas visando remover todo material excedente das operações anteriores, garantir a forma geométrica final do molde e obter a melhor qualidade da superfície possível, com o objetivo de minimizar o tempo de polimento. Nesta operação são geralmente empregadas máquinas de fresamento CNC de 3, 4, ou 5 eixos simultâneos. Para as operações de acabamento, tipicamente adotam-se fresas esféricas, as quais combinadas com a cinemática da operação, possuem a capacidade de usinar o produto (molde) para sua forma final, como superfícies côncavas e convexas (Denkena, *et al.*, 2015 e Souza, 2004).

Ramos, Relvas e Simões (2003) compararam as superfícies usinadas por uma fresa esférica de $\varnothing 6$ mm, com base em três estratégias de acabamento diferentes: radial, *raster* e *3D offset*. Os parâmetros de usinagem $a_p = 0,5$ mm, $v_c = 70$ m/min, $f = 1000$ mm/min foram mantidos constantes. A geometria da peça utilizada no estudo foi uma hélice de três pás, utilizada em barcos motorizados. Os autores encontraram diferenças entre as estratégias de usinagem quando comparadas em função do acabamento da superfície e a topografia. A estratégia *3D offset* apresentou melhores resultados de acabamento, $R_a = 0,83 \mu\text{m}$, sendo 11% inferior a estratégia *raster* e 25% a radial. A topografia da superfície gerada pela estratégia *3D offset* apresentou vales formados pelo raio da fresa com padrão uniforme, as cristas são mais baixas e menos amplas do que os gerados pelas outras estratégias.

Vopát, *et al.*, (2015) analisaram o desgaste de uma fresa esférica de $\varnothing 12$ mm e a rugosidade da superfície usinada em função da área de contato entre a ferramenta de corte e a peça. Os parâmetros de usinagem ($a_p = 0,15$ mm, $v_c = 113$ m/min, $f = 186$ mm/min, $a_e = 0,5$ mm), e o ângulo de inclinação da peça de trabalho em 15° , foram mantidos constantes. A variável consistia na escolha da estratégia de usinagem, alternando entre o corte em rampa ascendente e rampa descendente. O desgaste de flanco foi o tipo de desgaste predominante nas ferramentas. Na usinagem em rampa descendente, o valor do desgaste de flanco atingiu mais de 0,3 mm após 86 minutos de corte, sendo inferior ao obtido

na usinagem em rampa ascendente. Analisando a rugosidade da peça, após 10,75 minutos de usinagem a estratégia ascendente proporcionou uma superfície com $R_a = 1,16 \mu\text{m}$ e a estratégia descendente uma rugosidade de $R_a = 1,58 \mu\text{m}$. Ambas as ferramentas foram utilizadas até o fim de vida e posteriormente a rugosidade foi medida novamente, sendo $R_a = 1,69 \mu\text{m}$ para estratégia ascendente e $R_a = 2,02 \mu\text{m}$ para a estratégia descendente.

No contexto do fresamento de superfícies de moldes e matrizes, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar o impacto da estratégia de usinagem no fresamento com fresas esféricas em relação ao acabamento da superfície, a topografia gerada e ao desgaste da ferramenta.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos de usinagem foram realizados em um centro de usinagem vertical do fabricante ROMI, modelo D600, com potência nominal no eixo árvore de 10 kW e rotação máxima de 10000 rpm, comandada numericamente pelo comando Siemens Sinumerik 828D. Para a fixação das ferramentas foi utilizado o sistema hidromecânico CoroChuk 930 da fabricante Sandvik Coromant. As ferramentas utilizadas foram fresas esféricas CoroMill® Plura (código do fabricante R216.42-06030-AI06G 1610) inteiriça de metal-duro, fabricadas pela empresa Sandvik Coromant com $\varnothing 6 \text{ mm}$, e cobertura por PVD de (Ti,Al)N₂. As fresas foram fixadas com 22 mm de comprimento em balanço. Os parâmetros de usinagem foram adotados conforme recomendação do fabricante e estão mostrados na Tab. 1.

Tabela 1. Parâmetros de usinagem.

Parâmetro	Valor
Velocidade de corte (v_c)	150 m/min
Profundidade axial de corte (a_p)	0,5 mm
Avanço por dente (f_z)	0,08 mm
Profundidade radial de corte (a_e)	1% do diâmetro da ferramenta (0,06 mm)

Os corpos de provas foram fabricados a partir do aço VP Atlas, fornecido pela empresa Villares Metals, sendo fornecido no estado beneficiado com a dureza de $(40 \pm 2) \text{ HRC}$. Possuem dimensões de $(100 \times 100 \times 88,2) \text{ mm}$, duas regiões planas, um raio côncavo, um raio convexo e uma superfície inclinada em 15° . Foram utilizadas duas estratégias para os ensaios, representadas na Fig. 1. A ferramenta 01 foi utilizada para a estratégia ascendente (*up*), enquanto a ferramenta 02 foi utilizada para a estratégia descendente (*down*).

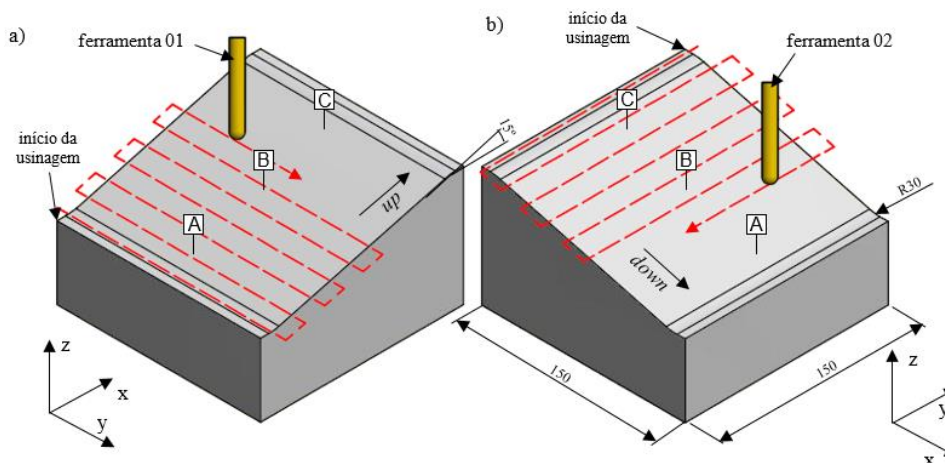


Figura 1. Representação do corpo de prova e da estratégia de corte: a) ascendente (*up*); e b) descendente (*down*).

A estratégia ascendente realiza um movimento em *zigue-zague* paralelamente ao eixo y, iniciando da região inferior do corpo de prova e incrementando (a_e) gradativamente pelo eixo x, tendo seu término na região superior do corpo de prova. A estratégia descendente realiza seus movimentos da mesma forma, entretanto o início da usinagem se dá na região superior do corpo de prova terminando na região inferior.

Para a avaliação da rugosidade foram mensurados parâmetros de rugosidade 2D e 3D nas regiões A, B e C distribuídas na superfície inclinada (Fig. 1). Para a aferição dos parâmetros de rugosidade 2D, foi utilizado o rugosímetro da fabricante Mitutoyo®, modelo SJ-310 utilizando o comprimento de amostragem de $l_c = 0,8 \text{ mm}$, filtro $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ e comprimento total de avaliação de 4 mm. Foram realizadas nove medições ao longo do eixo x em cada região, três na região central e três localizadas aproximadamente à 10 mm da borda esquerda e direita. O parâmetro de rugosidade 3D, foi coletado utilizando o microscópio Alicona® Infinite Focus G5, com ampliação de 50 vezes e área de avaliação de $1,44 \text{ mm}^2$. Os intervalos de confiança são expressos com 95% de confiança.

A avaliação do desgaste das ferramentas consiste na avaliação quantitativa utilizando o microscópio de foco infinito Alicona®. O desgaste das ferramentas foi avaliado ao final do ensaio com base no parâmetro VB_B (desgaste médio de flanco), de acordo com a norma ISO 8688-2:1989 e no parâmetro W_{MD} proposto por Boing (2016). O parâmetro W_{MD} , é definido como a máxima profundidade de defeito em relação à superfície de referência. Previamente aos ensaios de fresamento, as ferramentas utilizadas foram caracterizadas no microscópio de foco infinito. Após os ensaios, o procedimento foi repetido. Deste modo, obteve-se uma geometria de referência (ferramenta nova) e a geometria da ferramenta após os ensaios. Após, as duas geometrias são sobrepostas, sendo possível mensurar a diferença entre ambas. A Fig. 2 exemplifica a metodologia utilizada.

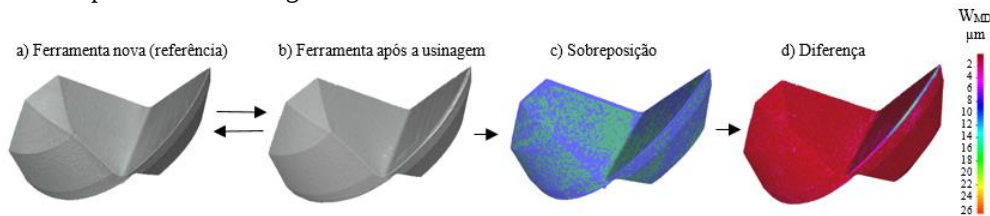


Figura 2. Metodologia utilizada para avaliação do desgaste das ferramentas. Adaptado de Boing (2016).

Após a comparação das duas superfícies, é possível realizar a medição do parâmetro W_{MD} . Com a ferramenta digitalizada também é possível avaliar o VB_B e o perfil de interesse, como o perfil desgastado da ferramenta.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A estratégia ascendente promoveu os menores valores de rugosidade no fresamento da superfície inclinada com ferramentas de ponta esféricas, conforme mostrado na Fig. 3.

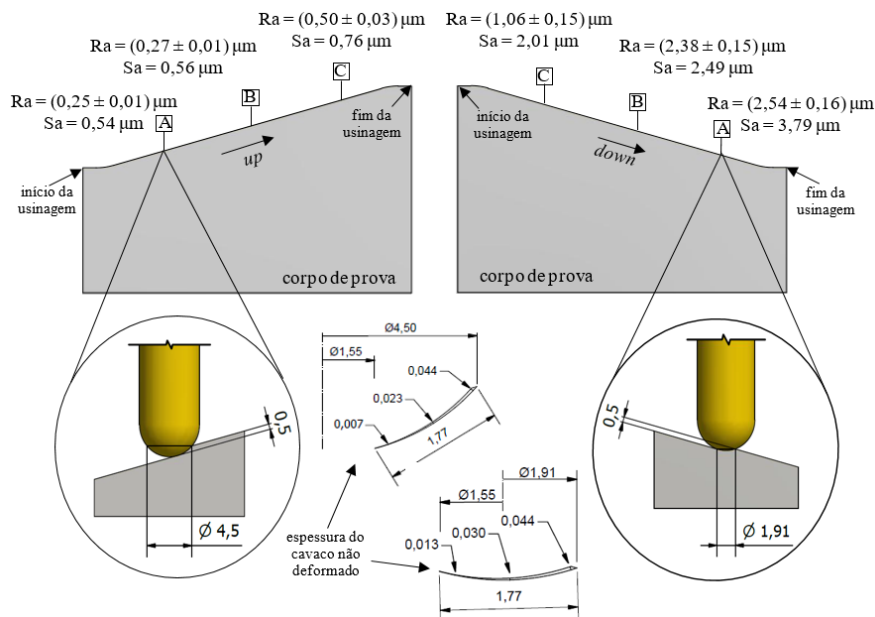


Figura 3. Rugosidade na região inclinada; região teórica de contato ferramenta-peça; espessura teórica do cavaco não deformado.

Para a usinagem em corte ascendente com superfície inclinada nota-se que os valores de rugosidade aumentam gradativamente ao decorrer da usinagem do corpo de prova, mantendo-se na classe N6 conforme NBR 8404/1984. O mesmo padrão é obtido para a usinagem descendente, entretanto com valores significativamente superiores, atingindo as classes de rugosidade N8 e N9. De forma geral, os valores de rugosidade na estratégia ascendente são aproximadamente 4,5 vezes inferiores aos resultantes da estratégia descendente.

Pode-se associar o alto valor de rugosidade com a região de corte da ferramenta. De acordo com Souza (2004), ferramentas de ponta esférica apresentam grande ineficiência da usinagem quando seu centro permanece na região de corte. As componentes da força de usinagem tendem a dobrar seu valor, quando comparadas às regiões onde o centro não atua no corte. No caso da usinagem promovida pela estratégia descendente, o centro da ferramenta permanece na região de corte o que pode contribuir para a instabilidade do processo, comprometendo a qualidade da superfície usinada.

Ao se analisar a espessura de cavaco não deformado teórico para usinagem ascendente temos um cavaco iniciando no diâmetro de corte de $\varnothing 1,55$ mm e terminado no diâmetro de $\varnothing 4,50$ mm, ou seja, o centro da ferramenta não atua e desta forma, a ferramenta não possui uma região com velocidade de corte nula, tendendo a ser mais efetiva. Já na estratégia descendente o centro da ferramenta atua no processo de corte. A velocidade de corte no centro é zero, e com isso, ocorre deformação e não o cisalhamento do material. Situação que pode aumentar as componentes da força de usinagem, a vibração do processo e com isso, acelerar o desgaste no centro da fresa. A representação da região de contato das ferramenta-peça, o desgaste e a topografia da superfície estão mostrados na Fig. 4.

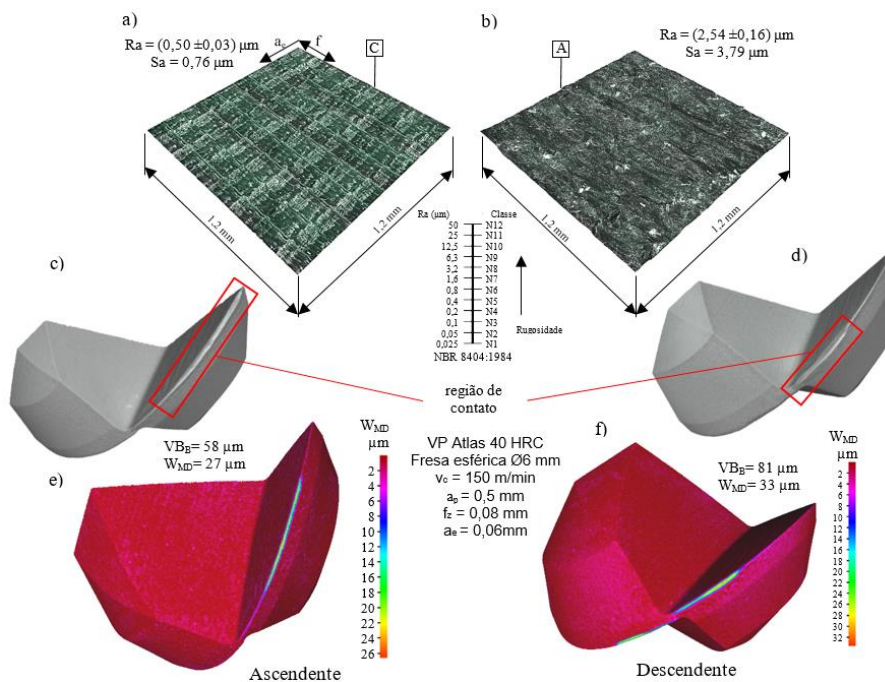


Figura 4. Topografia da superfície: a) corte ascendente região “C”; e b) corte descendente região “A”; c) região de contato ferramenta-peça estratégia ascendente; d) região de contato ferramenta-peça estratégia descendente; e) desgaste ferramenta na estratégia ascendente e f) desgaste ferramenta na estratégia descendente.

Conforme pode ser verificado na Fig. 4a, as superfícies geradas na estratégia ascendente podem ser consideradas periódicas, nas quais, torna-se possível distinguir a atuação do gume da ferramenta, resultando em um padrão linear relacionado entre a profundidade radial de corte (a_e) e o avanço da ferramenta (f). Nas superfícies geradas pela estratégia descendente (Fig. 4b) não é possível identificar claramente um padrão formado pela cinemática do processo de usinagem, inclusive, a topografia gerada mostra nítidas evidências de deformação plástica do material, o que acarreta em uma superfície com elevados valores de rugosidade em comparação à superfície usinada com a estratégia ascendente.

Contrariando os resultados de Vopát T. *et al* (2014) a estratégia ascendente apresentou um valor de desgaste inferior a estratégia descendente. Após a usinagem ascendente, a ferramenta apresentou um desgaste $W_{MD} = 27$ μm, valor aproximadamente 18% inferior a ferramenta 2, que resultou com $W_{MD} = 33$ μm. Além disto a comparação entres os desgastes das ferramentas mostra claramente o impacto da área de atuação efetiva do gume em cada estratégia de usinagem utilizada. Na estratégia ascendente, o maior diâmetro de contato é de $\varnothing 4,5$ mm, enquanto que na estratégia descendente, tem-se o diâmetro máximo efetivo de corte em $\varnothing 1,91$ mm e a atuação do centro da ferramenta durante o corte, resultando em um desgaste concentrado na parte central da ferramenta. Complementando a discussão, verifica-se que a área afetada da ferramenta em função do desgaste corresponde com a área teórica de contato ferramenta-peça.

4. CONCLUSÕES

Com base nos experimentos realizados afim de avaliar o impacto da estratégia de usinagem no fresamento com fresas esféricas em relação ao acabamento, à topografia gerada e ao desgaste da ferramenta, pode-se concluir:

Ao final da usinagem a estratégia ascendente obteve um valor de $Sa = 0,76$ μm, valor aproximadamente cinco vezes inferior à estratégia descendente $Sa = 3,79$ μm.

A topografia da superfície gerada pela usinagem ascendente é formada pela cinemática da operação (f e a_e), ou seja, superfície periódica onde ocorreu o cisalhamento efetivo do material usinado. Por outro lado, a estratégia descendente proporcionou um padrão considerado aperiódico com nítida deformação do material.

A estratégia ascendente proporcionou menor desgaste da ferramenta ($VB_B = 58 \mu\text{m}$ e $W_{MD} = 27 \mu\text{m}$) quando comparada à estratégia descendente ($VB_B = 81 \mu\text{m}$ e $W_{MD} = 33 \mu\text{m}$).

5. AGRADECIMENTOS

Às empresas parceiras desta pesquisa, especialmente a Sandvik Coromant pelo assessoramento técnico e disponibilização de recursos, serviços e materiais.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 8404:1984. Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos - Procedimento.
- Boing, D. Transição da aplicação do metal-duro revestido e do PCBN no torneamento de aços endurecidos em função da dureza e do teor de carbonetos. 287 f. Tese (Doutorado). *Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica*, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- Bonetti, I. Contribuições para desenvolver o conhecimento em operações de desbaste por fresamento no sentido axial. *Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Tupy*, Joinville. 2008, 106 p.
- Denkena, B.; Böß, V.; Nespola, D.; Gilge, P.; Hohensteinb, S; Seumeb, J. Prediction of the 3D Surface Topography after Ball End Milling and its Influence on Aerodynamics. *Procedia CIRP*, v.31, p.221-227, 2015
- ISO 8688-2 (1989) – Tool Life Testing in Milling – Part 2. End Milling. 1st ed. Genève, Switzerland, 31 p.
- Ramos, A. M.; Relvas C.; Simões J.A. The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, 136, 2003. p. 209-216.
- Souza, A.F. Contribuições ao Fresamento de Geometrias Complexas Aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidades. Tese (Doutorado), *Departamento de Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia de São Carlos*, São Carlos, 2004. 171 p.
- Vopát, T.; Peterka, J.; Šimna, V.; Kuruc, M. (2015). The Influence of Different Types of Copy Milling on the Surface Roughness and Tool Life of End Mills. *Procedia Engineering*, 100, 868–876.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EVALUATION OF THE MACHINING STRATEGIES IN THE MILLING OF INCLINED SURFACES WITH BALL NOSE END MILL

Gabriel Habitzreuter
Luiz Carlos Santana de Freitas
Denis Boing

University Center of Brusque – Unifebe, Dorval Luz street, 123 - Santa Terezinha's District - Brusque – SC.

gabriel.h@unifebe.edu.br, luizcsdefreitas@unifebe.edu.br, denisboing@unifebe.edu.br

Abstract. Components with complex geometry have an impact on the machining manufacturing chain of molds and die, especially concerning the hard-to-reach areas, high tool swing length and constant variation of the tool-workpiece contact area. In this context, this study focuses on the milling process of the inclined surfaces (15°) of the VP Atlas steel with 40 HRC, applying ball nose mill ($\varnothing 6 \text{ mm}$). The effect of the machining strategies upward and downward in the surface roughness, surface topography, and tool wear were evaluated. The upward machining strategy provided a better roughness surface $S_a = 0,76 \mu\text{m}$ compared to the down machining strategy $S_a = 3,79 \mu\text{m}$. The surface topography generated by the upward machining strategy is period, and it was formed by the kinematics of the operation (f and a_e). On the other hand, an aperiodic surface topography was generated by the downward machining strategy. The upward strategy provided lower tool wear ($VB_B = 58 \mu\text{m}$ and $W_{MD} = 27 \mu\text{m}$) compared to the downward machining strategy ($VB_B = 81 \mu\text{m}$ and $W_{MD} = 33 \mu\text{m}$).

Keywords: Milling. Machining strategies. Surface Roughness. Surface topography. Tool wear.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.