



Estudo de maquinabilidade da liga IN718 com recurso a ferramentas cerâmicas em operações de fresagem¹

Study of the machinability of IN718 alloy using ceramic tools in milling operations

Filipa Moreira¹, Vitor F.C. Sousa^{1,2}, Tiago E.F. Silva², Francisco Matos², Daniel Figueiredo³, Bruno Guimarães³, Tomás Aires³, Abílio M.P. de Jesus^{1,2}, Ana R. Reis^{1,2}

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal

² INEGI, Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, Portugal

³ R&D Department, Palbit S.A., Portugal

(Recibido 21 de julio de 2024, para publicación 4 de octubre de 2024)

Resumo – A maquinagem de superligas termorresistentes promove a elevada geração de calor, o rápido desgaste das ferramentas de corte e alterações superficiais nas superfícies geradas, mesmo com taxas de remoção de material conservadoras. O principal objetivo deste estudo é avaliar, através de uma metodologia experimental e numérica, a maquinabilidade da liga IN718 utilizando ferramentas de fresagem em SiAlON. O trabalho centra-se em operações de fresagem, com foco específico na evolução do desgaste e sua correlação com dados do processo, como as forças e binários de corte, temperatura e o movimento relativo entre rotação e avanço (concordante vs. discordante). A rugosidade superficial e alterações microestruturais das superfícies maquinadas, foram também objeto de estudo. Adicionalmente, foram construídas simulações numéricas do processo para evidenciar o mecanismo de corte, com o objetivo de identificar as condições de funcionamento ideais para aplicações industriais. As ferramentas de corte cerâmicas constituem uma alternativa viável a soluções convencionais compostas de carbonetos cementados (*i.e.*, WC-Co) especialmente porque permitem alcançar taxas de remoção muito elevadas.

Palavras-chave – Corte por arranque de apra, fresagem, Inconel 718, simulação numérica.

Abstract – Machining of heat-resistant superalloys promotes high heat generation, rapid wear of cutting tools and superficial alterations on the generated surfaces, even with conservative material removal rates. The main objective of this study is to evaluate, through an experimental and numerical methodology, the machinability of the IN718 alloy using SiAlON milling tools. The work focuses on milling operations, with a specific focus on the evolution of wear and its correlation with process data, such as cutting forces and torques, temperature and the relative movement between rotation and feed (concordant vs. discordant). The surface roughness and microstructural alterations of the machined surfaces were also studied. Additionally, numerical simulations of the process were built to demonstrate the cutting mechanism, with the aim of identifying the ideal operating conditions for industrial applications. Ceramic cutting tools are a viable alternative to conventional cemented carbide composite solutions (*i.e.*, WC-Co) especially because they allow achieving very high removal rates

Keywords – Shaving removal, Milling, Inconel 718, Numerical simulation.

1. INTRODUÇÃO

Dada a precisão, fiabilidade e versatilidade que conferem, os processos de maquinagem CNC tornaram-se indispensáveis no fabrico de peças de elevado valor acrescentado, como é o caso de aplicações

¹ Texto íntegro de la ponencia presentada en el XVI CIBIM, publicado con autorización.

aeroespaciais, automóvel ou do setor energético. Tais componentes possuem geometrias complexas que combinam, por exemplo, resistência (mecânica, térmica) e peso, sendo comumente obtidos por fabrico subtrativo. Embora a maquinagem CNC, de uma forma geral, permita a obtenção rápida de geometrias finais e funcionais, em certos componentes os tempos de fabrico podem ser significativos, especialmente devido à dificuldade no processamento de materiais com baixa maquinabilidade, como superligas à base de Ni (por exemplo o IN718), associada à necessidade de peças de alta precisão e/ou de grandes dimensões (*i.e.*, pás e discos de turbinas, turbocompressores, injetores e componentes da câmara de combustão) que requerem múltiplas operações. Apesar de estarem a ser desenvolvidos novos cenários de fabrico (híbrido), através de processos aditivos e subtrativos, o pós-processamento de maquinagem pode condicionar e atrasar o fabrico de peças. Por isso, é imperativo o incremento de produtividade nesta gama de materiais de baixa maquinabilidade.

Os cerâmicos estão a emergir como um material para ferramentas de corte capaz de revolucionar o sector do processamento por maquinagem de superligas. A capacidade das ferramentas de corte cerâmicas em manter a resistência mecânica a temperaturas elevadas permite velocidades de corte até 5 vezes superiores, em comparação com as ferramentas de carbonetos cementados [1]. Tal é particularmente relevante em superligas termorresistentes de condições metalúrgicas forjadas ou fabricadas aditivamente [2,].

A baixa condutividade térmica do IN718 [3] promove temperaturas durante o corte acima dos 750°C [4]. Apesar de comumente selecionadas por apresentarem a maior dureza disponível, as soluções à base de diamante não são viáveis dada a sua afinidade química com o elemento de liga Ni [5]. As ferramentas à base de nitreto cúbico de boro (CBN) constituem a solução viável de maior dureza para ferramentas de corte. No entanto, é essencial o compromisso entre dureza e tenacidade no desempenho de uma ferramenta de corte, tornando os materiais cerâmicos uma escolha alternativa [6], particularmente quando se pretendem aumentos de produtividade [7]. Enquanto que a influência dos parâmetros de corte tem sido amplamente estudada em ferramentas de corte mais comuns, como é o caso do metal duro, [8] é ainda relativamente escassa a informação acerca do uso de ferramentas cerâmicas [9]. Consequentemente, é imperativo efetuar uma investigação exaustiva que abranja a ferramenta de corte e a peça de trabalho para avaliar e prever as repercussões dos parâmetros de corte e do desgaste da ferramenta na integridade da superfície.

Holmberg *et al.* [10] realizaram um estudo comparativo entre ferramentas de corte cerâmicas e de carbonetos sinterizados. Foi demonstrada a melhor qualidade superficial das superfícies geradas com ferramentas cerâmicas, quando comparadas com ferramentas em metal duro. No que respeita à integridade superficial, as ferramentas cerâmicas promoveram tensões residuais mais uniformes, independentemente da zona concordante ou discordante da pista maquinada. As ferramentas de metal duro promoveram maior variabilidade, com perfis de tensões residuais assimétricos. Zheng *et al.* [11] executaram ensaios de fresagem de IN718, com ferramentas de SiAlON, em regimes de elevadas velocidades de corte. Os autores concluem que o amaciamento térmico promove forças de corte médias gradualmente menores até uma temperatura de aproximadamente 700°C. A região das ferramentas mais suscetíveis são as faces de ataque e flanco que tiveram o mínimo desgaste a velocidades de corte de 900 mm/min, sendo os principais mecanismos de desgaste identificados *chipping* (lascamento da aresta de corte), propagação de microfissuras, abrasão e adesão. Zimmermann *et al.* [12] maquinaram pás de turbocompressores em IN718 com ferramentas integrais em SiAlON conseguindo aumentos de produtividade de 10 vezes em comparação com fresas em metal duro. Num estudo similar [13] foi registado que maiores temperaturas promovem maior desgaste, no entanto é importante frisar o compromisso entre o amaciamento térmico e as taxas de desgaste de forma a possibilitar aumentos significativos na produtividade do processo. Enquanto que autores indicam fenómenos de desgaste de maior intensidade em condições de fresagem concordante [14], outros concluem menor vida das ferramentas em fresagem discordante [15].

O presente estudo foca-se numa campanha experimental utilizando fresas integrais em SiAlON, em IN718 endurecido por tratamento térmico de envelhecimento. Foram testadas condições de fresagem concordante e discordante numa perspetiva de entender a influência da estratégia de maquinagem na performance da ferramenta e qualidade das superfícies maquinadas. Foi construído um modelo numérico de corte com capacidade de previsão dos esforços de corte e que permite diferenciar os tipos concordante e discordante do processo de fresagem quanto às condições de pressão e temperatura na interface peça-ferramenta.

2. APARATO EXPERIMENTAL

2.1. Par de materiais ferramenta-peça

A maquinabilidade da liga IN718 e o desempenho das ferramentas cerâmicas foi investigada através de operações de fresagem de topo. De forma a testar o material em condições comumente encontradas em ambiente industrial, a liga maquinada foi submetida a tratamento térmico de solubilização e posterior envelhecimento, garantindo-lhe uma dureza aproximada de 44 HRC. A composição da liga é apresentada na Tabela 1 tendo sido medida através de espectroscopia por emissão de faísca, mostrando-se dentro dos limites estipulados pela norma *ASTM B637*.

Tabela 1. Composição química do IN718.

	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al
wt%	53.83	17.94	17.67	5.33	2.90	1.00	0.52

Foram conduzidos ensaios instrumentados sem recurso a fluido de corte, utilizando um centro de maquinagem *DMG eVo 60 linear*. A medição dos esforços de corte foi conseguida através de uma célula de carga piezoelétrica rotativa (*Kistler 9170A*) montada no eixo-árvore da máquina-ferramenta e ligada a um condicionador de sinal (*Kistler 5238B*), que comunica com o sistema de aquisição (*Kistler 5697*).

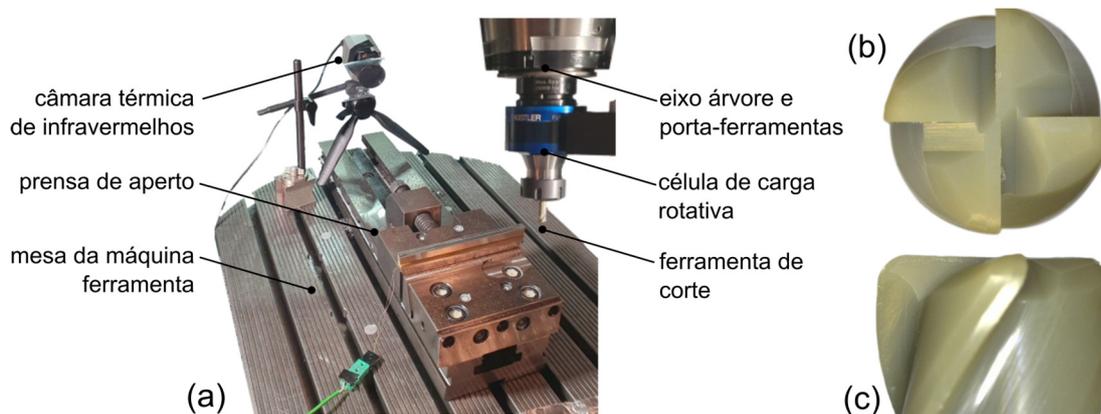


Fig. 1. Setup experimental dos ensaios de fresagem (a) e vista de topo (b) e lateral (c) das ferramentas de corte cerâmicas em SiAlON.

Na Fig. 1a está ilustrada a cadeia de medição. Foi utilizado o software *Dynoware* para análise dos resultados. Relativamente aos parâmetros de corte, foi selecionada uma profundidade de corte radial (a_e) de 1.6 mm, que corresponde a 20% do diâmetro da ferramenta. A profundidade de corte axial (a_p) escolhida foi de 0.5 mm e o avanço por dente (f_z) de 0.08 mm. Tendo em conta o limite máximo de rotação do spindle e o diâmetro da ferramenta, a velocidade de corte (v_c) testada, foi 400 m/min, que corresponde a uma frequência de rotação de aproximadamente 16000 rpm. As ferramentas de corte utilizadas, fresas integrais de 8 mm de diâmetro, ilustradas nas Fig. 1b e Fig. 1c, foram concebidas em SiAlON com uma percentagem de 25 a 30% de fase α . A restante fase, β , com composição entre 60 a 67% é dopada com ítrio (Y), que promove a estabilidade térmica. As ferramentas possuem um ângulo de ataque de 0° , ângulo de saída de 6° e um ângulo de hélice de 33° . A rugosidade das superfícies maquinadas foi medida paralelamente à direção de avanço da ferramenta utilizando um rugosímetro *Mitutoyo Surftest SJ-210*. A medição de temperaturas na pista linear maquinada foi feita através de uma câmara térmica de infravermelhos *Optris model PI 400i* e os resultados analisados através do software *Optris Pix Connect*.

2.2. Identificação das leis constitutivas e parâmetros físicos dos materiais

Para uma correta modelação do comportamento mecânico da liga a ser maquinada é imperativa a definição da sua curva de escoamento. Dadas as condições extremas de temperatura, extensão e taxa de extensão, foi utilizado o modelo *Johnson-Cook* (JC), descrito na equação 1, que prevê a influência de tais efeitos na curva de escoamento.

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

As constantes do primeiro termo da equação, A, B e n, que definem a curva de escoamento em condições de temperatura ambiente e em regime quasi-estático foram identificadas e calibradas com base em ensaios estáticos de compressão. Para tal, foram maquinados provetes cilíndricos ($\varnothing 6 \times 8 \text{ mm}$). Os ensaios foram feitos numa máquina de ensaios mecânicos (*Instron 5900R*) com uma velocidade do travessão de 1 mm/min. Dada a elevada resistência mecânica do material, foram posicionadas duas placas em carboneto de tungsténio (ver Fig. 2). Os topos dessas placas foram polidas e, nos topos dos provetes cilíndricos, foi depositado um filme fino de lubrificante (à base de grafite) com o objetivo de minimizar as condições de atrito durante o processo de compressão. As curvas de escoamento e do modelo utilizado encontram-se na Fig. 2 e as constantes identificadas na Tabela 2.

Tabela 2. Constantes identificadas para a liga de IN718 através da lei constitutiva Johnson-Cook.

	A	B	N	C	m
Inconel 718 -JC	1250	1000	0.3	0.013	1.3

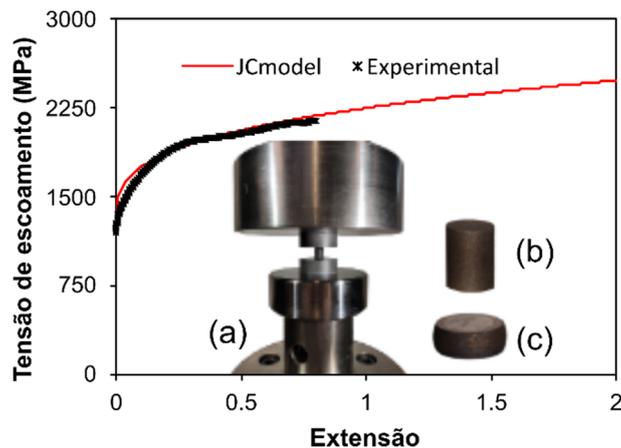


Fig. 2. Curva experimental de compressão e lei constitutiva identificada; aparato experimental do ensaio de compressão (a); provete pré- (b) e pós- (c) ensaio.

Tratando-se o processo de corte de um fenómeno termo-tribo-mecânico, foram também definidos parâmetros que permitem a adequada modelação numérica das trocas de calor e atrito entre a peça e ferramenta, de acordo com a biblioteca de materiais do software e literatura [16,17]. Em suma, quanto ao atrito, foi assumido um coeficiente de 0.6 (modelado pela lei de Coulomb) e um coeficiente de transferência de calor de 45 N/s/mm/°C [18,19].

2.3. Simulação fresagem concordante/discordante

Por ser um processo com múltiplas arestas de corte que entram em contacto com a peça, a fresagem é uma operação multifilar. Para além disso, podem definir-se duas configurações distintas entre direção do avanço, ilustrada pela velocidade de avanço, v_f , na Fig. 3, e rotação, n, tipicamente denominadas por fresagem concordante e discordante que geram aparas de espessura variável.

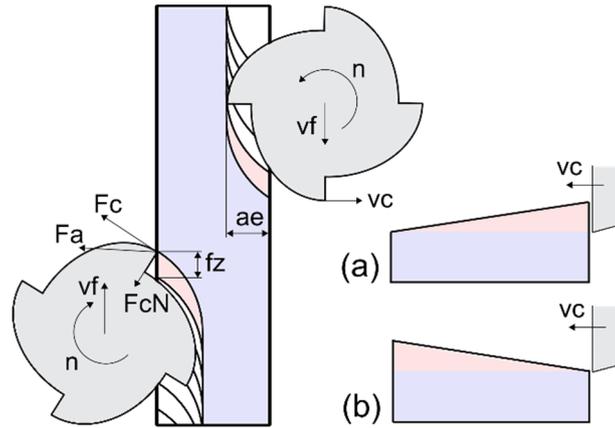


Fig. 3. Ilustração esquemática do processo de fresagem e simplificação para modelos numéricos de fresagem concordante (a) e discordante (b).

Embora seja um processo tridimensional a fresagem pode ser representada bidimensionalmente, aproximando-se do conceito de corte ortogonal, sendo que a espessura da apra é passível de ser modelada (linearmente) de acordo com o percurso de cada dente.

Os modelos numéricos de elementos finitos foram construídos no software DEFORM 2D, que utiliza uma abordagem Lagrangiana implícita. O critério de cedência de von Mises (J2) com encruamento isotrópico foi utilizado na modelação da peça a maquinar, com base nas curvas de escoamento definidas e descritas na secção 2.2. A ferramenta foi modelada como um corpo rígido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Esforços de corte

A Fig. 4 exibe a evolução da força ativa de corte em função do comprimento de corte em condições de fresagem concordante e discordante. É notória a necessidade de maior esforço de corte em fresagem discordante, que apresenta uma tendência monotónica, quase-linear de maior inclinação do que a tendência de forças concordante. A fresagem discordante, por iniciar o corte com espessura de apra nula, poderia constituir uma solução vantajosa para ferramentas cerâmicas, dada a sua relativa fragilidade ao impacto. No entanto, os resultados evidenciam que tal fragilidade compete com a maior resistência ao corte dadas as condições de atrito menos vantajosas e maior desgaste (ver adiante na Fig. 5), que por sua vez se sobrepõe, indicando a adequabilidade da metodologia de fresagem convencional (concordante) em fresas cerâmicas.

A evolução das forças de corte pode ser explicada pelo desgaste progressivo dos gumes das ferramentas. À medida que as arestas de corte perdem a sua geometria inicial (por arredondamento ou quebra) gera-se uma maior magnitude de força na direção radial (F_{cN}) que potencia efeitos como a vibração, diminuindo a eficiência do processo e, por sua vez, promovendo mais desgaste. É também notório que os resultados obtidos para fresagem concordante são consideravelmente mais estáveis do que os de fresagem discordante, que apresenta oscilações significativas na força de corte ativa. Para além dos efeitos de vibração descritos, estas oscilações poderão estar relacionadas com a adesão e posterior libertação de apra na aresta de corte. Tal hipótese explica a flutuação dos valores de força na medida em que a medição automática da ferramenta (executada pela centro de maquinagem) possa ter sido enviesada por aparas, contribuindo para alterações nos parâmetros de corte e consequentemente, esforços de maior magnitude. Os resultados experimentais dos ensaios de fresagem são comparados com a estimativa numérica através do método dos elementos finitos (MEF) de força ativa de corte para um comprimento de corte correspondente à ação de um gume de corte na peça a maquinar ($L_c < 1$ mm).

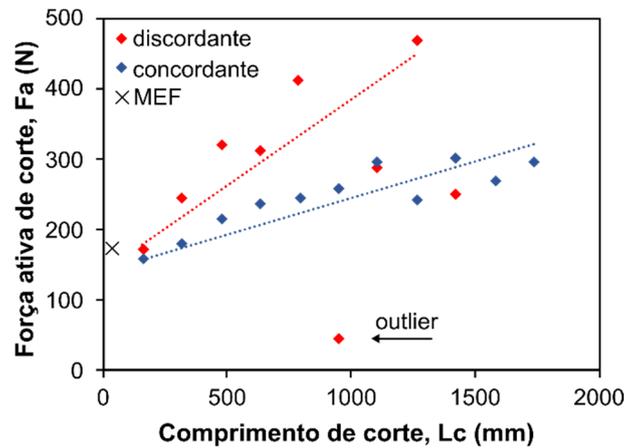


Fig. 4. Evolução experimental da força de corte ativa em função do comprimento de corte para condições de fresagem concordante e discordante; estimativa numérica de F_a para comprimento de corte ($L_c < 1$ mm).

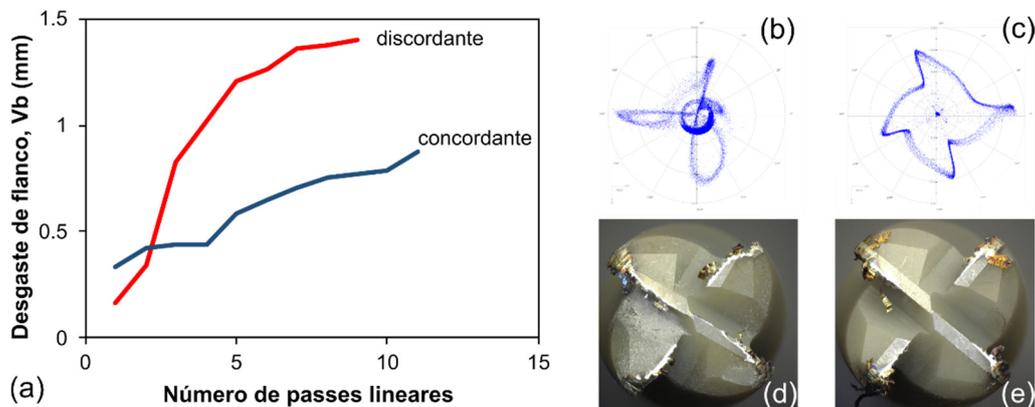


Fig. 5. Evolução do desgaste de flanco nas ferramentas integrais utilizadas em estratégias de maquinagem concordante e discordante (a); diagramas polares que exibem a magnitude do binário de corte em função da posição angular da ferramenta para um comprimento de corte aproximado de 1400 mm em fresagem discordante (b) e concordante (c) e desgaste da ferramenta para o mesmo comprimento de corte em fresagem discordante (d) e concordante (e).

Tais resultados são apenas comparáveis com comprimentos de corte experimentais incipientes, dado o efeito negligenciável do desgaste. A aproximação numérica de corte ortogonal captura adequadamente os níveis de carga experimentais, sem diferença significativa entre os modelos concordante e discordante, o que valida a construção do modelo numérico (*i.e.*, correta definição da área de apra não deformada, modelo de escoamento, coeficiente de atrito) e permite estimar variáveis adicionais como temperatura do processo e pressões de contacto na interface ferramenta-peça que evidenciam a diferença nas condições tribo-mecânicas entre a metodologia con- e discordante.

3.2. Desgaste das ferramentas

A considerável adesão de apra e fragmentos de apra nos gumes de corte (e entre eles) é exibida na Fig. 5d e Fig. 5e. Tal efeito é potenciado pela elevada tenacidade e amaciamento térmico (promovido pelo corte) da liga IN718 e promove o desgaste irregular das arestas de corte na medida em que com o arrefecimento das aparas aderidas estas tornam-se mais duras e, quando se soltam durante o corte promovem o arrancamento de partes da ferramenta. Tal efeito é compatível com o maior desgaste em fresagem disconcordante, dada a entrada do gume de corte ser feita para uma espessura de apra nula, o que resulta em maior atrito e consequentemente, maior adesão.

A Fig. 5a exibe a evolução do desgaste em cada tipo de estratégia aplicada corroborando a maior estabilidade do processo de fresagem concordante na maquinagem da liga IN718 com ferramentas em SiAlON. Adicionalmente, na Fig. 5b e Fig. 5c, são exibidas as medições dos binários de corte. É possível observar que os valores máximos de binário são coincidentes com a posição angular dos gumes de corte. Para além disso é notório o desequilíbrio angular de binário na ferramenta em corte discordante, dado o elevado desgaste numa das arestas de corte (ver Fig. 5d), sendo que no passe de maquinagem seguinte a ferramenta colapsou.

3.3. Qualidade superficial

A Fig. 6 apresenta os valores de rugosidade das superfícies maquinadas. Tais medições foram apenas executadas no fim da vida útil das ferramentas. Por isso, apesar da melhor qualidade superficial promovida pela fresagem concordante, o facto de em tal estratégia a vida útil ser maior, promoveu uma pior rugosidade final do que a ferramenta em estratégia discordante. A figura mostra também um segmento da superfície maquinada onde são evidentes defeitos como aparas aderidas à superfície. Este efeito é altamente prejudicial à qualidade da superfície e vida útil da ferramenta, dada a entrada de aparas no processo, que são remaquinadas. Ocorre também o efeito de rebarba que tem um efeito similar, com principal expressão nas entradas e saídas da ferramenta na peça

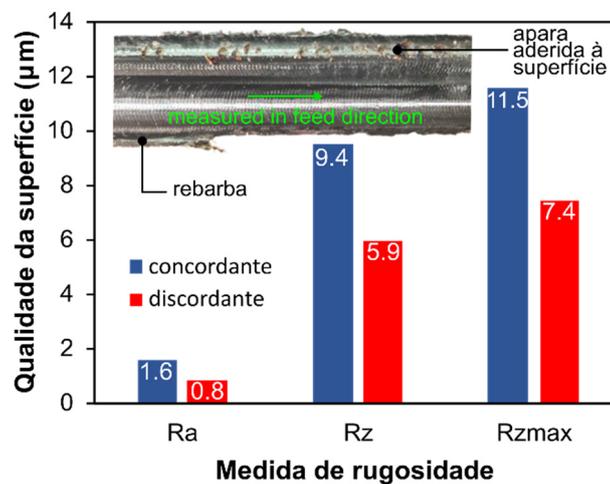


Fig. 6. Valores de rugosidade das superfícies maquinadas em fresagem concordante e discordante para o comprimento de corte correspondente ao fim de vida da ferramenta de corte; defeitos ocorrentes nas superfícies maquinadas.

3.4. Temperatura e pressão de contacto

A Fig. 7 apresenta os resultados de pressões e temperaturas de contacto na interface entre a ferramenta de corte e a peça a maquinar, em função do modo de fresagem, obtidas através do modelo numérico. A evolução de tais variáveis no percurso de uma única aresta de corte ajuda a compreender as diferenças na vida útil das ferramentas entre a fresagem discordante e concordante. A principal diferença entre esses dois modos de fresagem consiste na sequência temporal entre o momento em que a pressão de interface e a temperatura são máximas na aresta de corte da ferramenta, durante o percurso de um gume de corte. No caso da fresagem concordante, o momento em que a pressão na zona de corte é máxima difere do momento em que a temperatura da ferramenta é máxima. Assim, no momento de pressão de contacto máxima, a temperatura é relativamente baixa, apesar da sua tendência de subida acentuada. Na fresagem discordante a pressão de contacto máxima atua sobre a ferramenta quando a temperatura também se aproxima do seu pico, contribuindo assim para a rápida deterioração da aresta de corte da ferramenta. A sequência temporal dos efeitos termomecânicos corroboram as condições de utilização mais severas nas ferramentas submetidas a fresagem discordante.

Os resultados da simulação relativos à pressão de contacto na superfície da ferramenta apresentam um valor máximo para o processo de fresagem concordante, enquanto que a fresagem discordante obtém o valor máximo de temperatura de superfície.

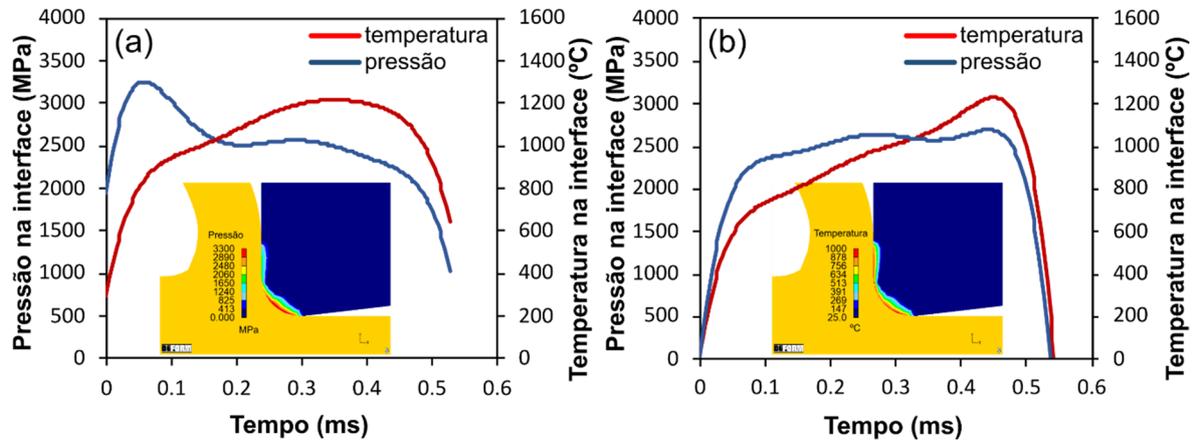


Fig. 7. Pressões e temperaturas na interface de contacto entre a ferramenta de corte e a peça a maquinar, em função do modo de fresagem: concordante (a) e discordante (b).

O aumento da temperatura no final do processo de fresagem discordante pode ser considerado como um efeito real e não apenas como uma singularidade numérica, considerando que o mesmo fenómeno é visível nos resultados obtidos experimentalmente, através da câmara termográfica. A Fig. 8 exibe o aumento de temperatura médio na superfície maquinada com uma passagem da fresa. Apesar de não ser uma medida direta da temperatura da ferramenta, a comparação das temperaturas médias permite diferenciar os modos de fresagem concordante e discordante quanto às temperaturas médias observadas numa área circunscrita à pista maquinada. É possível observar que tal temperatura média é aproximadamente 20°C superior no caso da fresagem discordante. O aumento da temperatura pode ser explicado pelas elevadas taxas de deformação da apana durante o corte. As elevadas taxas de deformação a que o material da peça é submetido provocam um aumento da resposta mecânica e, conseqüentemente, um aumento do calor gerado devido à deformação plástica. Indiretamente, a fresagem discordante aparenta gerar um maior nível de deformação plástica, que, por sua vez, promove a degradação rápida da ferramenta, dada pela proximidade temporal do ponto de carga térmica e mecânica máximas.

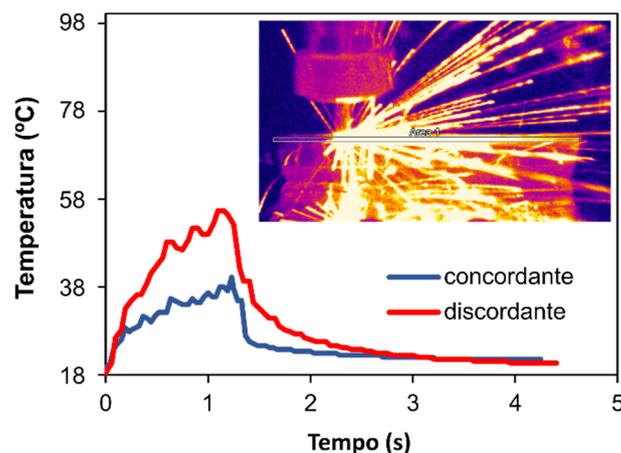


Fig. 8. Evolução da temperatura média na pista maquinada (área 1) em função do tipo de fresagem; captura dos ensaios de corte através de câmara térmica de infravermelhos.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo explora o tema da maquinabilidade da liga IN718 utilizando ferramentas integrais cerâmicas (SiAlON) de 8 mm de diâmetro e 4 dentes de corte. Com base nos resultados experimentais e numéricos, é possível concluir:

- A elevada resistência mecânica da liga IN718 aliada à considerável ductilidade promovem desgaste acentuado nas ferramentas cerâmicas, nomeadamente sob os mecanismos de adesão que promovem lascamento da aresta de corte, flaco e face de ataque.
- Apesar do desgaste acentuado, as velocidades de corte alcançadas significam cenários de produtividade melhorados, nomeadamente em termos de taxa de remoção de material, quando comparados com ferramentas de metal duro revestido.
- A caracterização do material via ensaios de compressão provou ser uma metodologia eficaz na determinação da curva de escoamento do material para posterior identificação de uma lei constitutiva.
- O modelo numérico foi capaz de prever esforços de corte com qualidade satisfatória em regimes de corte isentos de desgaste e permitiu distinguir os modos de fresagem concordante do discordante. Permitiu ainda evidenciar que as condições máximas de pressão de contacto e de temperatura ocorrem, para o percurso de um gume de corte, em simultâneo na fresagem discordante, validando a sua inadequabilidade no par de materiais estudado.
- Foi medido experimentalmente e corroborado numericamente que a temperatura máxima do modo de fresagem discordante é superior à do concordante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto Hi-rEV – Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002) cofinanciado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), República Portuguesa através do programa NextGeneration EU.

REFERÊNCIAS

- [1] Li, L., He, N., Wang, M., Wang, Z.G., “High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts”. *Journal of materials processing technology*, **129**(1-3), 127-130 (2002)
- [2] GE Reports, TURN UP: Larger, Lighter Additive Parts. Disponível em: <https://www.geaerospace.com/news/articles/manufacturing-product/turn-larger-lighter-additive-parts>
- [3] Agazhanov, A.S., Samoshkin, D.A., Kozlovskii, Y.M., “Thermophysical properties of Inconel 718 alloy”. *Journal of Physics: Conference Series*, **1382**(1), 012175 (2019)
- [4] De Bartolomeis, A., Newman, S.T., Jawahir, I.S., Biermann, D., Shokrani, A., “Future research directions in the machining of Inconel 718”. *Journal of Materials Processing Technology*, **297**, 117260 (2021)
- [5] Mahesh, K., Philip, J.T., Joshi, S.N., Kuriachen, B., “Machinability of Inconel 718: A critical review on the impact of cutting temperatures”. *Materials and Manufacturing Processes*, **36**(7), 753-791 (2021)
- [6] Zhao, B., Wang, D., Qi, G., Ding, Z., Wei, Z., “Enhancing hardness-toughness synergy through entropy gain effects: Implications for ceramic cutting tool materials”. *Journal of Alloys and Compounds*, **1005**, 176131 (2024)
- [7] Agirreurreta, A.A., Pelegay, J.A., Arrazola, P.J., Ørskov, K.B., “High productivity machining of holes in Inconel 718 with SiAlON tools”. In *AIP Conference Proceedings*, **1769**(1). AIP Publishing. October (2016)
- [8] Toubhans, B., Fromentin, G., Viprey, F., Karaoui, H., Dorlin, T., “Machinability of inconel 718 during turning: Cutting force model considering tool wear, influence on surface integrity”. *Journal of Materials Processing Technology*, **285**, 116809 (2020)

- [9] Molaiekiya, F., Aliakbari Khoei, A., Aramesh, M., Veldhuis, S.C., “Machined surface integrity of inconel 718 in high-speed dry milling using SiAlON ceramic tools”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 1941-1950 (2021)
- [10] Holmberg, J., Wretland, A., Berglund, J., Beno, T., “A detailed investigation of residual stresses after milling Inconel 718 using typical production parameters for assessment of affected depth”. *Materials Today Communications*, 24, 100958 (2020)
- [11] Zheng, G., Zhao, J., Cheng, X., Xu, R., Zhao, G., “Experimental investigation on sialon ceramic inserts for ultra-high-speed milling of Inconel 718”. *Materials and Manufacturing Processes*, **31**(5), 633-640 (2016)
- [12] Zimmermann, R., Welling, D., Venek, T., Ganser, P., Bergs, T., “Tool wear progression of SiAlON ceramic end mills in five-axis high-feed rough machining of an Inconel 718 BLISK”. *Procedia CIRP*, 101, 13-16 (2021)
- [13] Zimmermann, R., Michel-Angeli, N., Welling, D., Ganser, P., Bergs, T., “Surface integrity in high-feed roughing of Inconel 718 with SiAlON end mills”. *Procedia CIRP*, 108, 595-600 (2022)
- [14] Tian, X., Zhao, J., Zhao, J., Gong, Z., Dong, Y., “Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69, 2669-2678 (2013)
- [15] Roy, S., Kumar, R., Panda, A., Das, R.K., “A brief review on machining of Inconel 718”. *Materials today: proceedings*, **5**(9), 18664-18673 (2018)
- [16] Dong, P., Wang, X., Zhang, M., Seshadri, S., “Conductivity properties of β -SiAlON ceramics”. *Science China Technological Sciences*, 55, 2409-2415 (2012)
- [17] Mallik, A.K., Acikbas, N.C., Kara, F., Mandal, H., Basu, D., “A comparative study of SiAlON ceramics”. *Ceramics International*, **38**(7), 5757-5767 (2012)
- [18] Jadam, T., Saurav D., Manoj M., “Influence of cutting tool material on machinability of Inconel 718 superalloy”. *Machining Science and Technology*, **25**(3), 349-397 (2021)
- [19] Alammari, Y. *et al.*, “Adhesion of Inconel 718 on Uncoated Tungsten Carbide Inserts in Interrupted Orthogonal Machining under MQL” *Procedia CIRP*, 103, 194-199 (2021)