

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE USINAGEM EM INCONEL VISANDO A APLICAÇÃO NAS INDÚSTRIAS AEROESPACIAL E AUTOMOTIVA

Sales-Contini, R.C.M.^{1,2*}, F.J.G. Silva^{2,3}

¹ *College of Technology São José dos Campos, Professor Jessen Vidal, Centro Paula Souza São José dos Campos/SP, Brazil*

² *ISEP, Polytechnic of Porto, Porto, Portugal*

³ *Associate Laboratory for Energy, Transports and Aerospace (LAETA-INEGI), Porto, Portugal*

**rita.sales@fatec.sp.gov.br*

Analysis of Inconel Machining Parameters for Aerospace and Automotive Applications

Eixo(s) Tecnológico(s): Produção Industrial

Resumo

Nos últimos anos, há uma clara demanda por estudos em novos materiais estruturais para aplicação em estruturas aeronáuticas. O desejo por materiais de alto desempenho levou ao desenvolvimento das ligas Inconel, devido as suas características de alta resistência mecânica que se mantém em elevadas temperaturas, alta resistência à fluência e à fadiga e excelente resistência a oxidação. Devido a isto, a indústria aeronáutica tem aplicado estes materiais em suas estruturas, entretanto, estas características representam um grande problema durante o processo de usinagem, pois promovem elevada geração de calor, implicando no desenvolvimento de altas taxas de desgaste da ferramenta de corte. Para que o processo de usinagem nestes materiais seja eficaz, se faz necessário o entendimento dos efeitos relacionados a escolha dos parâmetros de usinagem, ferramentas de corte e tratamento superficial destas ferramentas podendo assim otimizar o processo de acabamento. Portanto, é importante a obtenção uma base de dados experimental robusta que alimente a simulação numérica do projeto para que se entenda o processo de usinagem de estruturas composta por ligas Inconel possibilitando a prevenção os danos que podem ser ocasionados durante o processamento destes materiais. Neste trabalho são apresentados resultados provenientes da internacionalização do projeto pesquisa em RJJ desenvolvido em parceria com o ISEP, IPP, Porto; Portugal. Nos primeiros 6 meses de pesquisa foram focados no desenvolvimento de trabalhos com a liga Inconel. Outros trabalhos ligados à produção industrial também foram desenvolvidos e reportados aqui.

Palavras-chave: *Inconel, Processos de usinagem, Furação, Fresagem, Otimização de processos.*

Abstract

In recent years there has been a clear demand for research into new structural materials for use in aerospace structures. The desire for high-performance materials has led to the development of Inconel alloys due to their characteristics of high mechanical strength that is maintained at high temperatures, high resistance to creep and fatigue and excellent resistance to oxidation. The aerospace industry has therefore used these materials in its structures. However, these properties pose a major problem during the machining process as they promote high heat generation, resulting in high cutting tool wear rates. In order to effectively machine these materials, it is necessary to understand the effects related to the choice of machining parameters, cutting tools and the surface treatment of these tools in order to optimize the machining process. Therefore, it is important to obtain a robust experimental database to feed the numerical simulation of the project, in order to understand the machining process of structures made of Inconel alloys, making it possible to prevent the damage that can be caused during the machining of these materials. This paper presents the results of the internationalization of the RJJ research project developed in partnership with ISEP, IPP, Porto, Portugal. The first 6 months of the research focused on developing work with Inconel alloys. Other work related to industrial production has also been developed and reported here.

Keywords: *Inconel, Machining processes, Drilling, Milling, Process optimization.*

1. Introdução

As ligas INCONEL® são materiais resistentes à oxidação, à corrosão cáustica e por água de alta pureza, e à fissuração por corrosão sob tensão (SCC). A baixa condutividade térmica (k) é uma propriedade física chave para ambientes de alta temperatura extrema, sendo uma das muitas propriedades do material que fazem das ligas INCONEL® um material difícil de maquinar e difícil de moldar. Influencia a distribuição de calor durante o processo de maquinação, afetando a integridade da superfície quando se aplicam técnicas tradicionais de maquinação de corte com arranque de apara e tratamento de superfície [1]. Devido ao rápido endurecimento por trabalho na região de formação do cavaco, tensões residuais de tração ou compressão são introduzidas na superfície dos materiais, levando à deformação plástica da peça INCONEL® ou da ferramenta, resultando eventualmente na formação de arestas postiças (BUE) e, conseqüentemente, na falha prematura da ferramenta [2]. Assim, estas considerações aumentaram a procura de novos métodos de fabricação para estas ligas difíceis de maquinar, tornando imperativo explorar a usinagem não convencional, uma vez que os tradicionais são propensos a grandes desafios na maquinação do INCONEL®, como a integridade da superfície, a rugosidade da superfície (Ra) e uma taxa de desgaste da ferramenta (TW) excessivamente grande. Uma grande vantagem dos processos não convencionais é a maquinação de alta precisão de qualquer metal difícil de cortar, independentemente da complexidade da forma, sem necessidade de qualquer forma de contacto entre a ferramenta e a peça de trabalho [3].

Este trabalho apresenta os resultados obtidos a partir do projeto de internacionalização pesquisa em RJI desenvolvido em parceria com o ISEP, IPP localizado na cidade do Porto em Portugal. Nesta primeira fase do desenvolvimento deste projeto foram realizadas revisões de literatura sobre processos de usinagem não convencionais, revestimento para ferramenta de usinagem e, também, sobre modelos numéricos para otimização de processos de usinagem em ligas INCONEL. Em um segundo momento, foi desenvolvido um breve estudo sobre o desgaste de ferramentas de WC-Co substrate com revestimento multicamada de TiN/TiAlN, que foi depositado por PVD HiPIMS (*High Power Impulse Magnetron Sputtering*) usada na usinagem de ligas INCONEL 718. Todos os resultados já foram apresentados em conferências e publicados na forma de artigos.

2. Materiais e Métodos

2.1 Metodologia aplicada para realização da revisão de literatura.

O método de pesquisa e compilação da informação foi orientado por critérios de qualidade, através da consulta do índice de citação e da influência da revista na comunidade acadêmica, e está sistematizado em tópicos. Este artigo é realizado graças a fontes de informação como a Science Direct, Springer e Taylor & Francis, bem como um livro da Academic Press, devido à sua grande fidelidade de conhecimentos, e de onde foram recolhidos 30 relatórios, sete capítulos de livros, 124 artigos e seis livros.

As informações relativas aos processos de usinagem não convencionais foram coletadas baseadas nas etapas seguintes:

1. Recolha de informação sobre os processos de usinagem não convencionais do INCONEL® 718 e 625 com as palavras-chave e a sua combinação.

Anais da VII Mostra de Docentes em RJJ

2. Durante a recolha de artigos, é efetuada uma avaliação da influência da revista com a sua pontuação *web of science*, a partir de 2021 (ignorando os quartis). Todas as revistas com um valor inferior a 1,8 são excluídas.

3. Consultar o resumo e as conclusões dos artigos recolhidos.

4. Compilação de informação de 2018 a 2023, tipo de processo não convencional e tipo de liga INCONEL®.

5. Escrever artigos de revisão sobre os processos de maquinação não convencionais da liga INCONEL®.

As informações relativas aos modelos numéricos aplicados à processos de usinagem foram coletadas baseadas nas etapas seguintes:

1. Foram pesquisadas informações com as palavras-chave "INCONEL® 718", "INCONEL® 625" e "critérios Johnson-Cook" para obter mais informações no exterior sobre a modelagem do material.

2. As palavras-chave "FEA" e "Traditional machining processes" foram acrescentadas para permitir a procura de informações sobre a modelação digital de processos de usinagem tradicionais. Para refinar ainda mais os dados, foram incluídas as palavras-chave "Numerical models" (modelos numéricos), "ABAQUS™", "ANSYS®" e "DEFORM®" para recolher as informações pretendidas.

3. Após a recolha dos artigos, a influência da revista foi avaliada através da sua pontuação na Web of Science a partir de 2022 (ignorando os quartis). Foram excluídas todas as revistas com um valor de IF inferior a três, embora tenha sido permitido o arredondamento à unidade.

4. O resumo e as conclusões dos artigos recolhidos foram analisados.

5. Foi compilado o conhecimento de 2013 a 2023 sobre a modelação dos processos tradicionais INCONEL® 718 e 625.

6. Foi escrito o artigo de revisão sobre a análise numérica da liga INCONEL® na previsibilidade da maquinação tradicional.

2.2 Ensaios de para avaliação de desgaste de ferramentas durante a usinagem de ligas INCONEL 718

2.2.1 Ligas Inconel e ferramenta de usinagem

A liga Inconel 718, que foi fornecida sob a forma de uma barra redonda com um diâmetro de 158 mm, foi utilizada nos ensaios de fresagem. O cdp de Inconel 718 foi fornecido com os seguintes tratamentos térmicos: (1) recozimento em solução a 970°C, seguido de têmpera em água; (2) endurecimento por precipitação a 718°C durante 8 horas, arrefecimento em estufa a 621°C durante 8 horas, e resfriamento ao ar.

Relativamente às ferramentas, foram utilizadas fresas de topo com substrato de WC-Co, contendo 6% de Co, com tamanho médio de grão de 0,3 µm, grau 6110, fornecidas pela INOVATOOLS, S.A. (Leiria, Portugal).

As ferramentas foram revestidas com um revestimento multicamada de TiN/TiAlN, que foi depositado pelo processo PVD HiPIMS, utilizando um equipamento CemeCom CC800/HiPIMS, com quatro suportes de alvos. A deposição foi efetuada através das seguintes etapas: abertura dos obturadores dos alvos de titânio puro, na qual ocorreu a deposição da primeira camada fina de TiN, e depois a deposição da camada exterior de TiAlN, com o fecho dos obturadores iniciais e a abertura dos alvos de TiAl. A camada de TiAlN era mais espessa.

2.2.2 Usinagem

2.2.2.1 Ensaaios de usinagem

Como a barra de Inconel 718 foi fornecida com um diâmetro de 158 mm, a estratégia selecionada foi a fresagem baseada na operação de fresagem de face, na qual a ferramenta móvel se deslocaria do centro da barra para a sua periferia. Além disso, a altura da barra era de 1 metro, o que significava que tinha de ser cortada em secções com uma altura de 32 mm, e depois fresada a uma altura constante de 30 mm. Uma altura reduzida evita vibrações excessivas da peça durante as operações de usinagem. Os testes de fresagem foram efetuados no centro de maquinaria CNC HAAS VF-2 (HAAS Automation, Oxnard, CA, EUA, com uma velocidade máxima de 10.000 rpm e uma potência máxima de 20 kW). Além disso, os ensaios foram efetuados com um fluido de corte com 5% de óleo em água.

2.2.2.2 Análise da rugosidade da superfície usinada

Nesta análise foi utilizado um perfilômetro Mahr Perthometer M1 (Mahr, Gottingen, Germany), com um valor de corte de 0,8 mm e comprimento de medição de 5,6 mm, no qual foram determinados os valores de rugosidade superficial em cada condição de acordo com a norma ISO 4288:1996 [4]. Assim, foi possível avaliar a estabilidade do processo de corte, o desempenho da ferramenta e a sua correlação com o desgaste resultante e as condições de maquinaria.

2.2.2.3 Análise do desgaste da ferramenta

Para caracterizar o desgaste sofrido pelas ferramentas ensaiadas em diferentes condições de maquinaria, foi utilizado um microscópio eletrônico de varrimento (MEV) FEI Quanta 400FEG equipado com um espectroscópio de raios X EDAX Genesis (EDS). As ferramentas foram primeiro limpas num banho de ultrassons durante 5 minutos com acetona e depois com etanol. Os espécimes foram então montados para a caracterização SEM. Com a análise MEV foi possível verificar os mecanismos de desgaste presentes e medir o desgaste na vista superior das ferramentas, nomeadamente, o desgaste de flanco (VB), mais precisamente, VB3 de acordo com a norma ISO 8688-2:1986 [5]. Juntamente com o SEM, a análise EDS foi utilizada para caracterizar a composição química da adesão do material maquinado à superfície da ferramenta de corte.

3. Resultados e Discussão

A seguir são apresentados os resultados desta pesquisa sobre o tema *Inconel* que foram apresentados na forma de trabalhos em conferências e na forma de artigos publicados.

- Pedroso, A.F.V.; Sousa, V.F.C.; Sebbe, N.P.V.; Silva, F.J.G.; Campilho, R.D.S.G.; Sales-Contini, R.C.M.; Jesus, A.M.P. A Comprehensive Review on the Conventional and Non-Conventional Machining and Tool-Wear Mechanisms of INCONEL®. *Metals* 2023, 13, 585. doi: 10.3390/met13030585.
- Sousa, V.F.C.; Fernandes, F.; Silva, F.J.G.; Costa, R.D.F.S.; Sebbe, N.; Sales-Contini, R.C.M. Wear Behavior Phenomena of TiN/TiAlN HiPIMS PVD-Coated Tools on Milling Inconel 718. *Metals* 2023, 13, 684. doi: 10.3390/met13040684.

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

- Pedroso, A.F.V. et al. (2023). A Review of INCONEL® Alloy's Non-conventional Machining Processes. In: Silva, F.J.G., Pereira, A.B., Campilho, R.D.S.G. (eds) Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Establishing Bridges for More Sustainable Manufacturing Systems. FAIM 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38241-3_86.
- Sebbe, N.P.V. et al. (2023). Wear Behavior Analysis of TiN/TiAlN Coated Tools in Milling of Inconel 718. In: Silva, F.J.G., Pereira, A.B., Campilho, R.D.S.G. (eds) Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Establishing Bridges for More Sustainable Manufacturing Systems. FAIM 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38241-3_87.
- A.F.V. Pedroso, V.F.C. Sousa, N.P.V. Sebbe, F.J.G. Silva, R.D.S.G. Campilho, R.C.M. Sales-Contini, A.M.P. Jesus. A brief review of INCONEL numerical analysis on traditional machining predictability 5th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing Procedia Computer Science 00 (2023) 000–000.

Os resultados da pesquisa sobre o tema FML que foram apresentados na forma de trabalhos em conferências e na forma de artigos publicados.

- Costa, R.D.F.S.; Sales-Contini, R.C.M.; Silva, F.J.G.; Sebbe, N.; Jesus, A.M.P. A Critical Review on Fiber Metal Laminates (FML): From Manufacturing to Sustainable Processing. *Metals* 2023, 13, 638. doi: 10.3390/met13040638

Trabalhos em colaboração sobre temas diversos publicados em revistas ou apresentados em conferências:

- Nogueira, F.R., Pedroso, A.F.V., Sousa, V.F.C., Sebbe, N.P.V., Sales-Contini, R.C.M., Barbosa, M.L.S. (2023). A Brief Review of Injection-Mould Materials Hybrid Manufacturing Processes. In: Silva, F.J.G., Pereira, A.B., Campilho, R.D.S.G. (eds) Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Establishing Bridges for More Sustainable Manufacturing Systems. FAIM 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38241-3_88
- Marques, S.S.L.; Sales-Contini, R.C.M.; Otubo, J.; Bernardi, H.H. Influence of Heat Treatment on the Corrosion Resistance in Shape Memory Stainless Steel Based on FeMnSiCrNiCo. *Alloys* 2023, 2, 110-121. doi: 10.3390/alloys2020008
- Rita de Cássia Mendonça Sales-Contini, Camila Belo Gomes Brito, Sofia Salles Lantyer Marques, Mauricio Vicente Donadon, Fractographic analysis of composite joints under cryogenic conditions, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 125, 2023, 103436, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103436>.
- M. Gaspar, F. J. G. Silva, R. D. S. G. Campilho, A. F. V. Pedroso, N. P. V. Sebbe, R.C.M. Sales-Contini. 2D and 3D Wires Formability for Car Seats: A Novel Full-Automatic Equipment Concept towards High Productivity and Flexibility, *International Conference on Machine Design 2023*, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- E. Eiras, F. J. G. Silva, R. D. S. G. Campilho, A. F. V. Pedroso, N. P. V. Sebbe, R.C.M. Sales-Contini, A novel full-automatic concept to produce Bowden cables first subset improving productivity, flexibility, and safety, *International Conference on Machine Design 2023*, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

- V. F. C. Sousa, F. J. G. Silva, R. D. S. G. Campilho, R.C.M. Sales-Contini, A. F. V. Pedroso, N. P. V. Sebbe, J. Moreira A new model for increasing economic and environmental sustainability in cutting abrasive discs from rectangular shapes, International Conference on Machine Design 2023, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- P.M.S. Ramalho, R.D.S.G. Campilho, F.J.G. Silva, A.F.V. Pedroso, R.C.M. Sales-Contini Productivity improvement of control cable manufacturing equipment for the automotive industry, International Conference on Machine Design 2023, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- P.M.P. Curralo, R.D.S.G. Campilho, J.A.P Pereira, F.J.G. Silva, A.F.V. Pedroso, R.C.M. Sales-Contini, Design of a connector assembly equipment for the automotive industry. International Conference on Machine Design 2023, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- R.C.M. Sales-Contini, J. P. Costa, F.J.G. Silva, A. G. Pinto, I. M. Pinto, R.D.S.G. Campilho. Influence of Laser Marking Parameters in the DMC Code on the Quality of PBT/Glass Fibre Composite Surface Analysed by SEM. International Conference on Machine Design 2023, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- A.F.V. Pedroso, F.J.G. Silva, R.D.S.G. Campilho, R.C.M. Sales-Contini, R.R. Moreira Computer Application for Electric Network Management of an Industrial Company. International Conference on Machine Design 2023, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- R.C.M. Sales-Contini, H. Pinto, F.J.G.Silva, R.D.S.G. Campilho. Die Casting Thermal Diffusion Study Through the Natti Gunter Process. International Conference on Machine Design 2023, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Trabalhos submetidos a conferência ELEC 2023- Holanda como segunda-autora.

- The contribution of SMED to the sustainability of organizations.
- The impact of SMED on productivity and safety.

Submissão de 2 artigos para a revista Optics and Laser Technology como primeira autora.

- Comparison of the quality of laser marking parameters in DMC and QR codes on the quality of PBT/glass fiber composite surface using doe factorial and Anova.
- Qualitative analysis of DMC code obtained by ND:YAG laser on the surface of PBT/glass fibre composites by SEM.

Submissão de 1 artigo para a revista Machine como co-autora.

- A novel full-automatic concept to produce Bowden cable's first subset improving productivity, flexibility, and safety.

Submissão de 1 artigo para a revista Journal of Cleaner Production como primeira autora.

- Correlation between growth economic, environmental policies and level of the educational process of the population with the production of waste.

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

Submissão de 1 artigo para a revista IEEE Transactions on Plasma Science como co-autora.

- Characterization of a hybrid joint between AA2024-T3 treated by Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) with a thermoplastic composite.

Aceito para publicação na Journal of Polymer Research 2023 como primeira autora.

- Carbon Nanotube-Reinforced Epoxy Composites in Seawater: Effect of Amino-Functionalization and Post-Curing Process.

4. Considerações finais

Os resultados apresentados mostram que a produção de conteúdo científico possui um aumento significativo quando o pesquisador participa de um grupo de pesquisa grande e bastante ativo. A internacionalização da pesquisa também traz de experiência ao pesquisador por ter contato com diferentes métodos e processos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

O projeto proposto sobre o tema INCONEL ainda está em desenvolvimento. Novas ferramentas com diferentes revestimentos serão testadas e também será realizado o estudo de um modelo numérico para otimização do processo de usinagem em ligas Inconel.

O trabalho na área de FML ainda está na etapa inicial devido ao atraso do recebimento da matéria-prima. Estima-se que mais material científico nesta área será publicado a partir de Dezembro 2023, pois a matéria-prima foi recebida no mês de Setembro e o FML será fabricado em Outubro e a partir desta período os ensaios de usinagem em FML será iniciado.

Agradecimentos

Aos membros da CPRJI que acreditaram no meu trabalho e me apoiaram nesta jornada. Agradecimentos a Me. Paula Hypólito, a Dra Cristina de Carvalho Ares Elisei e a Dra Aparecida Maria Zem Lopes, Dr. William Marcos Muniz Menezes, Dra Heide Heloise Bernardi, Dr, Jorge Tadao Matsushima pelo apoio profissional. Ao CPS pelo financiamento desta pesquisa. Ao Dr. Francisco J. G. Silva por oferecer a oportunidade para o desenvolvimento dos projeto em parceria. Aos alunos do grupo de Pesquisa do Departamento de Mecânica do ISEP, IPP; Porto pela parceira durante a confecção dos corpos-de-prova, execução dos ensaios e confecção dos artigos e trabalhos submetidos á conferências. E ao ISEP-IPP-Porto pela infraestrutura oferecida para o desenvolvimento deste projeto.

Referências

[1] ANDRESEN PL, 5 - Understanding and predicting stress corrosion cracking (SCC) in hot water. In: Féron D, Staehle RW (eds) **Stress Corrosion Cracking of Nickel Based Alloys in Water-cooled Nuclear Reactors**. Woodhead Publishing, pp 169-238 (2016).

[2] ANBURAJ R, PRADEEP KUMAR M, Experimental studies on cryogenic CO₂ face milling of Inconel 625 superalloy. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 36, n.7, p. 814-826, 2021. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1866199>

[3] OKE SR, OGUNWANDE GS, ONIFADE M, et al., An overview of conventional and non-conventional techniques for machining of titanium alloys. **Manufacturing Rev**, v. 7, n.34, p. 1-24, 2020. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2020029>

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

[4] ISO 4288:1996 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture - International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996.

[5] ISO 8688-2:1986 - Tool Life Testing in Milling – Part 2: End Milling; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1986.