

ANÁLISE DE TENSÃO RESIDUAL SUPERFICIAL DA LIGA DE INCONEL 718 FRESADA COM FERRAMENTA DE METAL DURO

André Rezende de Figueiredo Oliveira, arfoliveira@ufu.br¹

Iago Carvalho Teixeira, iago_patrocinio@hotmail.com¹

Lucas Barcelos da Silva, lukas10barcelos@hotmail.com¹

Álison Rocha Machado, alison.rocha@pucpr.br¹⁻²

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG, 38.400-089, Brasil.

² Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Av. Imaculada Conceição 1155, Prado Velho Curitiba, PR, CEP: 80.215-901

Resumo: *Tensões residuais superficiais presentes em componentes de engenharia podem interferir de forma significativa na resistência à fratura, na vida em fadiga e na capacidade desses materiais suportar em carregamento. As tensões residuais se sobrepõem à tensão aplicada ao equipamento, podendo aumentar ou reduzir a tensão efetiva aplicada, conforme a sua natureza trativa ou compressiva. As tensões residuais podem ser introduzidas deliberadamente ou de forma acidental durante os diversos processos de fabricação. No fresamento de ligas de níquel, tensões residuais compressivas e trativas podem ser introduzidas na superfície do material, aumentando ou diminuindo a vida em fadiga e a resistência à iniciação e à propagação de trincas. Por se tratar de material nobre e, normalmente, aplicado em componentes da área aeronáutica, onde a falha em serviço deve ser evitada a qualquer custo, para preservar vidas humanas, este trabalho propõe estudar o comportamento das tensões residuais deixadas na peça após usinagem em diversas condições de corte. Os testes de fresamento foram realizados em Inconel 718 em condições de desbaste e acabamento, com ferramentas de metal duro novas e desgastadas e as tensões residuais foram medidas por difração de Raios-X. De uma forma geral, obteve-se tensões compressivas para ferramentas novas e tensões residuais trativas para ferramentas desgastadas, próximas do fim de vida.*

Palavras-chave: Inconel 718, Ferramenta de Metal Duro, Fresamento frontal, Tensões Residuais.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, pesquisas têm sido direcionadas no desenvolvimento de superligas de níquel, pois apresentam excelentes características como resistência mecânica associada à resistência à corrosão, tanto à temperatura ambiente como em altas temperaturas (ASM METALS HANDBOOK, 1990).

Estas ligas constituem aproximadamente 45% do total de material utilizado na fabricação de motores para aviação, fato que se deve à sua excepcional resistência mecânica e alta resistência à oxidação em condições extremas de temperatura (EZUGWU, 1999). Ligas de níquel são também usadas em veículos espaciais, motores de foguete, aviões experimentais, reatores nucleares, equipamento petroquímico e em outras aplicações onde os materiais estão sujeitos a altas temperaturas.

Segundo Ezugwu (2005), devido às boas propriedades mecânicas, as ligas de níquel são materiais de baixa usinabilidade. As superligas de níquel possuem baixa condutividade térmica e afinidade com os materiais das ferramentas de corte. A grande dificuldade encontrada na usinagem das superligas a base de níquel estão relacionadas à geração de grande quantidade de calor durante o processo de deformação e atrito entre o cavaco-ferramenta-peça.

A compreensão dos fatores que promovem e acumulam tensões residuais é significativo nos componentes mecânicos, pois essas tensões pode alterar a resistência à fratura, a vida em fadiga e a capacidade de suportar carregamento (ABKOWITZ, 1995).

Segundo diversos autores, entre eles Trent e Wright (2000), Machado et al. (2015) e Reddy (2010), a indústria busca sempre maior eficiência de usinagem: melhor acabamento superficial e condições de corte mais severas. Em termos gerais, os processos de usinagem das ligas de níquel envolvem grande adesão entre a ferramenta e a peça, resultando em maior desgaste da ferramenta e, conseqüentemente em menor vida útil da mesma. O processo é complexo, pois uma maior taxa de desbaste envolve, em geral, maior desgaste da ferramenta e baixos níveis de integridade superficial.

Segundo Devillez e colaboradores (2011), os processos de usinagem em ligas a base de níquel inferem defeitos na microestrutura, na superfície e subsuperfície. Uma das formas de se minimizar os efeitos da usinagem sobre a integridade superficial das peças usinadas é a seleção de condições de corte, material da ferramenta, geometria e revestimento da ferramenta de forma ideal.

Para Lodini (2003), o estudo das tensões residuais inseridas em processos de usinagem em ligas de níquel se mostra como um tema de interesse científico e tecnológico atual, em uma grande variedade de aplicações de engenharia,

onde as normalmente são exigidas alta resistência à fratura, elevada vida em fadiga e alta capacidade de suportar cargas. Quando estes produtos têm severas exigências de qualidade e confiabilidade, exigem validação experimental. Nos setores que envolvem risco de vida e ambientais, como o de energia e o de transportes aéreo, a validação experimental é obrigatória por imposições de legislações específicas.

Segundo Abkowitz (1995), os valores de tensões acima do limite de escoamento do material irão ocasionar uma deformação plástica do mesmo, havendo assim, uma redistribuição das tensões residuais. De forma geral, as tensões residuais se sobrepõem à tensão de serviço. Quando um componente com tensões trativas na superfície sofre carregamento de tração, este material será sobrecarregado localmente pelas tensões residuais trativas existentes na superfície do componente. O inverso ocorre quando um componente com tensões residuais compressivas na superfície sofre carregamento trativo, onde as tensões residuais compressivas irão subtrair as tensões trativas aumentando o desempenho deste componente em serviço (Lodini, 2003).

Segundo Lodini (2003), na prática, a determinação de curvas de tensões residuais é complexa, pois o estado de tensões apresentado no material é tridimensional. O valor máximo em módulo que as tensões residuais poderão chegar é o próprio limite de escoamento do material.

Neste trabalho as tensões residuais induzidas pelo processo de usinagem por fresamento são estudadas. O trabalho investiga as relações entre as condições de usinagem, o desgaste da ferramenta e o grau de tensão residual inserido na liga de Inconel 718. Embora o foco principal seja a tensão residual, foram medidos também os parâmetros de rugosidade superficial.

2. METODOLOGIA

Para este trabalho utilizou-se o processo de fresamento frontal, ferramenta de metal duro (WC-Co) classe S20 e fluido de corte aplicado na forma de jorro, utilizando-se óleo solúvel semissintético ME-1 da Quimatic Tapmatic, uma emulsão leitosa branca, com vazão de 1268 ± 117 L/h. A ferramenta de corte utilizada foi uma fresa com capacidade para fixação de 5 insertos, marca Sandvik modelo CoroMill 490, para cantos a 90° , com 63 mm de diâmetro. Possui sistema de fixação cone ISO 40 e piloto de travamento de 22 mm. Utilizou-se um Centro de Usinagem CNC, marca Romi, modelo Discovery 760, com 11 Kw de potência e rotação máxima de 10.000 rpm.

Para cada condição de usinagem (Tabelas 1 e 2) avaliou-se a influencia o nível de tensão residual, sendo que o processo de fresamento foi realizado em condições de acabamento e desbaste.

Tabela 1 - Planejamento Experimental para condição de Acabamento (A).

Código da Condição de Usinagem	Velocidade de Corte (Vc) [m/min.]	Profundidade (ap) [mm]	Avanço (f) [mm/dente]
A-1	40	0,25	0,10
A-2	40	0,50	0,10
A-3	30	0,25	0,10
A-4	40	0,50	0,05
A-5	30	0,50	0,05
A-6	40	0,25	0,05
A-7	30	0,25	0,05
A-8	30	0,50	0,10

Tabela 2 - Planejamento Experimental para condição de Desbaste (D).

Código da Condição de Usinagem	Velocidade de Corte (Vc) [m/min.]	Profundidade (ap) [mm]	Avanço (f) [mm/dente]
D-1	20	1,00	0,20
D-2	25	1,00	0,20
D-3	25	1,50	0,20
D-4	20	1,00	0,30
D-5	20	1,50	0,20
D-6	25	1,50	0,30
D-7	20	1,50	0,30
D-8	25	1,00	0,30

Verificou-se também a influência do desgaste de flanco médio sobre a indução de tensões residuais na peça. Os desgastes iniciais nas ferramentas foram produzidos via fresamento de aço VP20 (aço para matriz). A utilização deste aço ocorreu por escassez do material Inconel 718. As condições de desgaste VB_B iniciais foram pré-definidas em quatro condições: VB_B 0 (0,0 mm - ferramenta nova); VB_B 1 (0,1 mm); VB_B 2 (0,2 mm); VB_B 3 (0,3 mm); VB_B 4 (0,4 mm).

Para realização da caracterização topográfica da peça, foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo SJ-201. Este equipamento determina parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_t e R_z pelo perfil bidimensional obtido pela varredura linear da sonda e flexão de cantilever mediante a variação topográfica da peça.

Foram avaliadas também as condições de tensão residual da rede por difração de raios-X.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 mostra os resultados dos parâmetros de rugosidade para usinagem em condições de acabamento com ferramenta nova, onde foram plotados os parâmetros: R_a , R_z , R_q e R_t , todos com média e desvio padrão (DP).

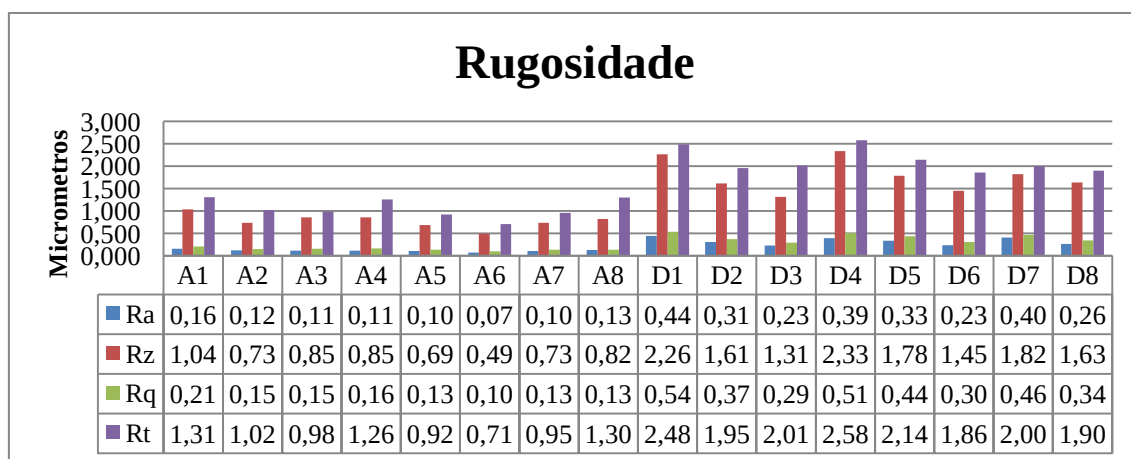


Figura 1. Parâmetros de rugosidade (R_a , R_z , R_q , R_t) para condições de usinagem de acabamento e desbaste com ferramenta nova.

Considerando a condição de desbaste os parâmetros apresentam magnitude 2 vezes maior do que para o parâmetro de acabamento. Os resultados para os parâmetros de rugosidade para usinagem em condições de acabamento mostram valores R_a variando de 0,07 a 0,18 μm , R_z de 0,49 a 1,04 μm , R_q de 0,10 a 0,21 μm e R_t de 0,71 a 1,31 μm .

Para as condições de desbaste os valores são praticamente o dobro, R_a variando de 0,23 a 0,44 μm , R_z de 1,31 a 2,33 μm , R_q de 0,29 a 0,54 μm e R_t de 1,90 a 2,58 μm .

Observa-se que com o desgaste de flanco da ferramenta, há uma redução dos parâmetros de rugosidade para usinagem de acabamento (Figura 2), isto pode ser explicado pelo arredondamento da ponta da ferramenta com o desgaste. Porém para usinagem em condição de desbaste (Figura 3), há um acréscimo dos valores dos parâmetros de rugosidade, ou seja, o acabamento superficial da peça aumenta com o desgaste da ferramenta.

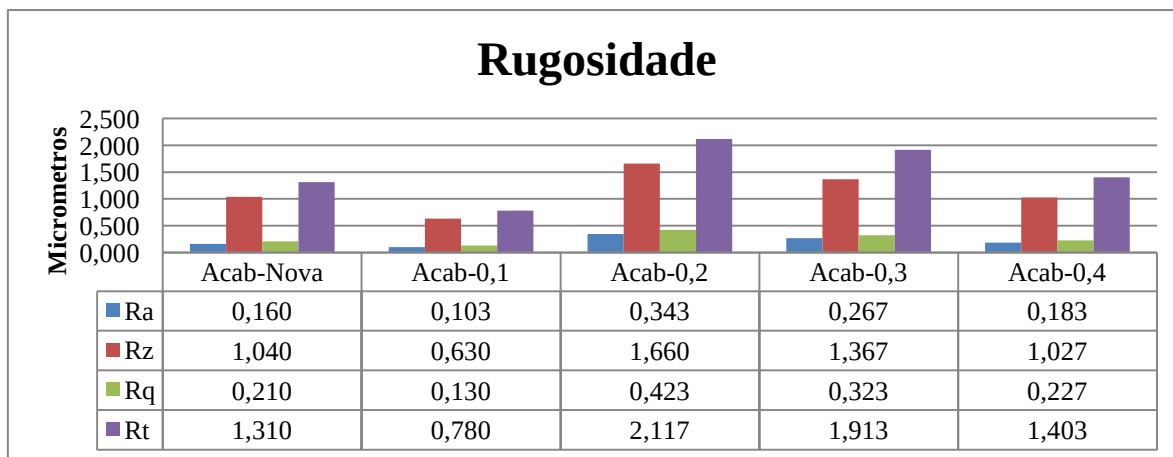


Figura 2. Parâmetros de rugosidade (R_a , R_z , R_q , R_t) para condições de usinagem de acabamento com ferramenta nova e desgastada.

A Figura 3 mostra os resultados para os parâmetros de rugosidade para usinagem em condições de desbaste com ferramenta nova e usada (desgastada).

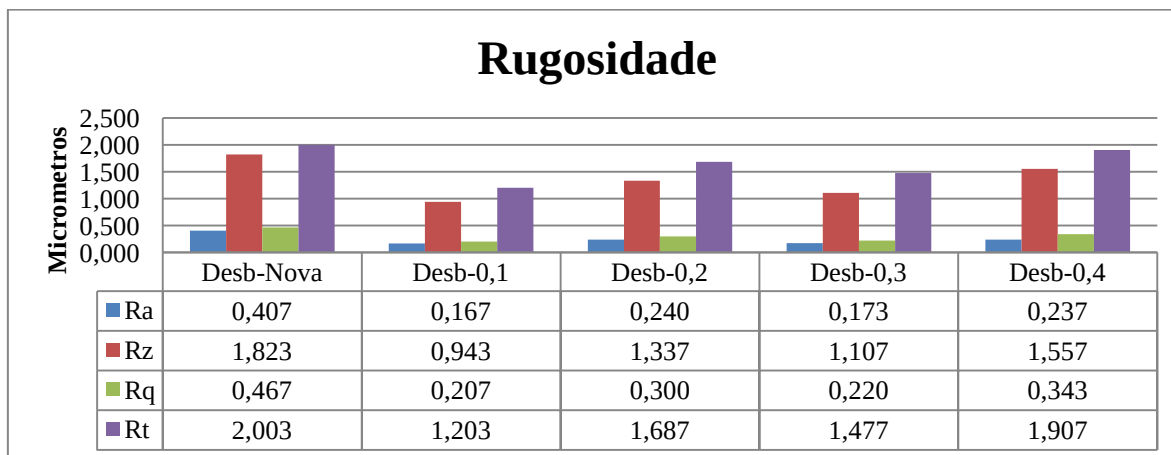


Figura 3. Parâmetros de rugosidade (Ra, Rz, Rq, Rt) para condições de usinagem de desbaste com ferramenta nova e desgastada.

A Figura 5 mostra os resultados das tensões residuais medidos nas secções transversais e longitudinais da peça (Figura 4) usinadas por processo de fresamento do Inconel 718, nas condições de acabamento e desbaste com ferramenta nova.

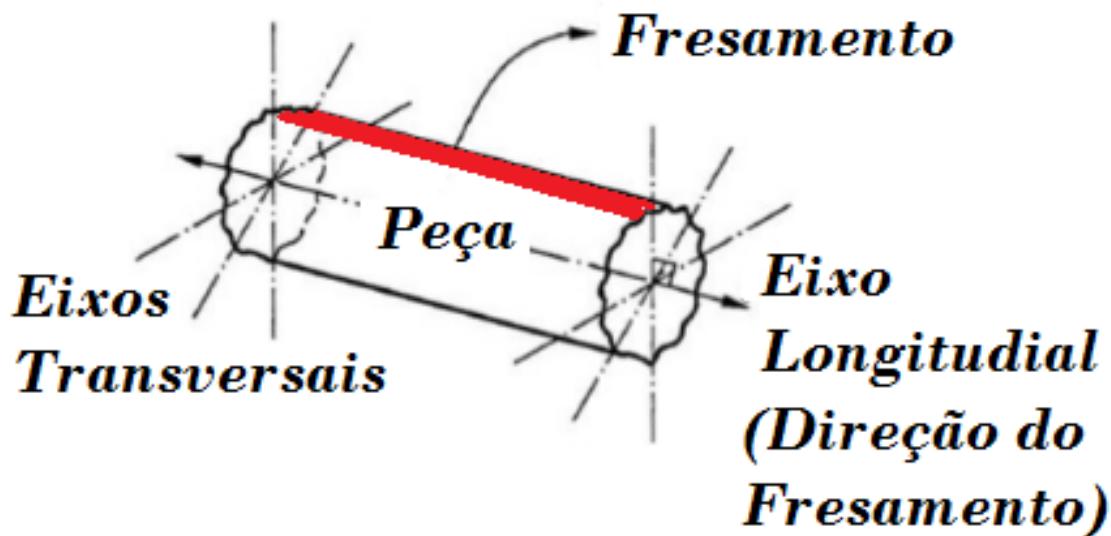


Figura 4. Ilustração da direção de fresamento com relação aos eixos transversais e eixo longitudinal das peças.

Para todos os ensaios realizados com ferramenta nova observou-se tensões residuais negativas, ou seja, tensões residuais compressivas. Lembrando que todos os ensaios foram realizados com fluido de corte.

A Figura 6 mostra os resultados das tensões residuais (transversais e longitudinais) para o processo de fresamento do Inconel 718 com ferramentas usadas (desgastadas), nas configurações de acabamento e desbaste. A condição de acabamento utilizada nesta avaliação foi a A1: $V_c = 40$ m/min.; $a_p = 0,25$ mm; $f = 0,1$ mm e condição de desbaste utilizada nesta comparação foi a D7: $V_c = 20$ m/min.; $a_p = 1,5$ mm; $f = 0,3$.

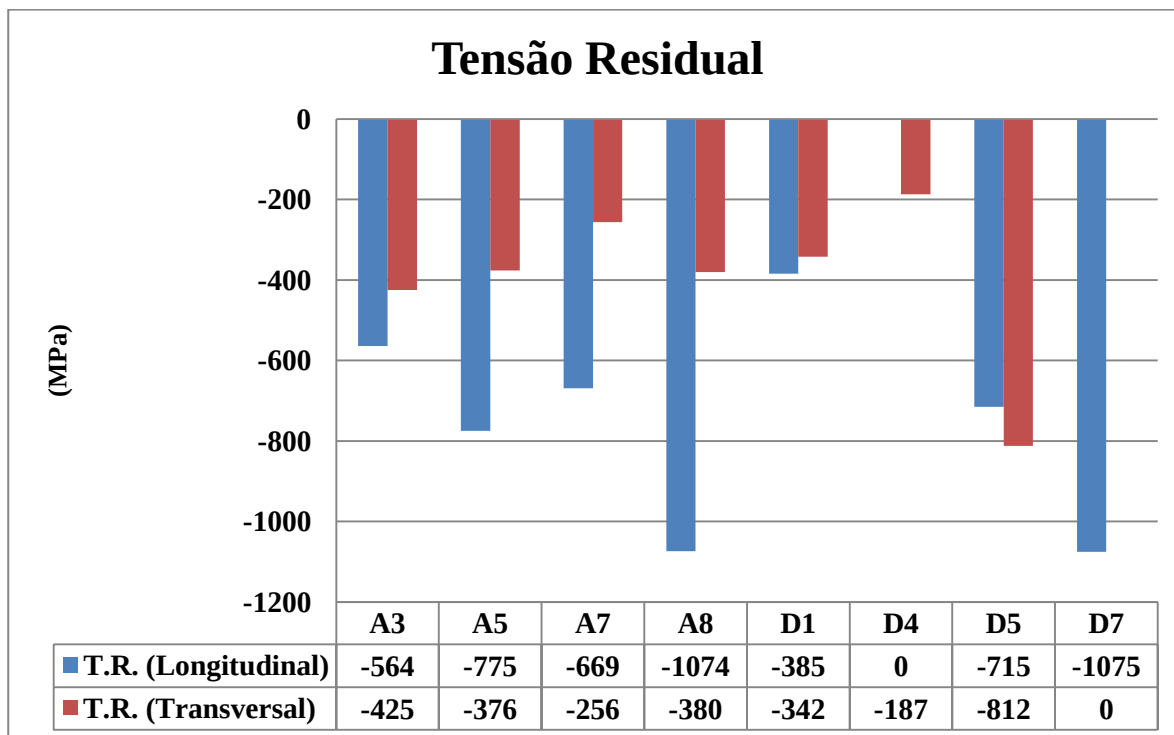


Figura 5. Resultados para tensões residuais (TR), fresamento do Inconel 718 nas configurações de acabamento e desbaste, ferramenta nova.

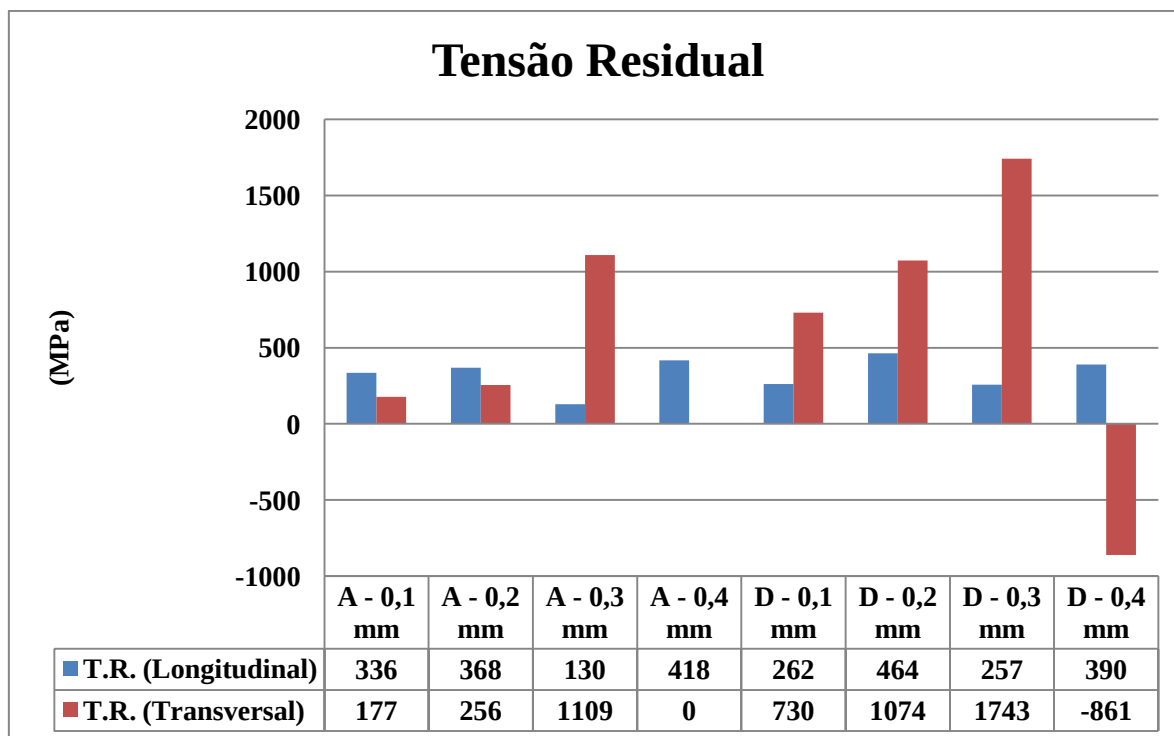


Figura 6. Resultados para tensões residuais, fresamento do Inconel 718 nas configurações de acabamento (A) e desbaste (D), ferramenta usada com 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 mm de desgaste.

Para os resultados com ferramenta nova e tensões residuais longitudinais nas condições D4 e tensões residuais transversais D7, observaram-se erros no registro de sinal, desta forma os mesmos foram desconsiderados. O mesmo ocorreu para os resultados para tensões residuais transversais com ferramenta usada na configuração de acabamento e desbaste da ferramenta de 0,4 mm.

Para as ferramentas desgastadas, quase todos os ensaios realizados apresentaram tensões residuais positivas, ou seja, tensões residuais trativas. Estes resultados são importantes e preocupantes, pois diminuem a resistência à fadiga e à fratura do componente.

Para ferramentas novas os resultados mostram que tensões residuais compressivas.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que os processos de usinagem em ligas à base de níquel (Inconel 718) inferem defeitos na integridade superficial da peça.

Os processos de indução de tensão residual na superfície e subsuperfície podem ser controlados pela configuração de usinagem e/ou pelo grau de desgaste de ferramenta do corte.

De uma forma geral, obteve-se tensões compressivas para ferramentas novas e tensões residuais trativas para ferramentas desgastadas.

5. AGRADECIMENTOS

À Capes, CNPq e FAPEMIG pelo auxílio financeiro aos pesquisadores. À Villares Metals pelo fornecimento do material e à Sandvik pela doação das ferramentas de corte.

6. REFERÊNCIAS

- Abkowitz, S.; Burke, J. J.; Hiltz Jr., R. H., 1995, Technology of Structural Titanium. D. Van Nostrand Company, pp.31-32.
- ASM METALS HANDBOOK, V.2, 1990, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, USA.
- Devillez, A., Le Coz, G., Dominiak, S., Dudzinski, D., 2011; Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity, Journal of Materials Processing Technology. 211, p. 1590– 1598.
- Ezugwu, E. O., 2005; Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1353–1367.
- Ezugwu, E. O., Wang, Z. M., Machado, A. R.; 1999; The Machinability of Nickel-Based Alloys: A Review. Journal of Materials Processing Technology, p. 1–16.
- Lodini, A., 2003; “Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation”. Taylor & Francis, p-48.
- Machado, A. L.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B., 2015, “Teoria da usinagem dos materiais”, 3ª ed., Editora Edgard Blucher, São Paulo, pp. 407.
- Reddy, N. S. K., Nouari, M., Yang, M.; 2010; Development of electrostatic solid lubrication system for improvement in machining process performance / International Journal of Machine Tools & Manufacture; 789–797.
- Trent, E. M. and Wright, P. K., 2000. *Metal cutting*. 4th Edition, Butterworth-Heinemann, London-UK, 2000, p. 446.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

RESIDUAL TENSION ANALYSIS ON THE SURFACE OF THE INCONEL 718 MILLING MILL WITH HARD METAL TOOL

André Rezende de Figueiredo Oliveira, arfoliveira@ufu.br¹

Iago Carvalho Teixeira, iago_patrocinio@hotmail.com¹

Lucas Barcelos da Silva, lukas10barcelos@hotmail.com¹

Álison Rocha Machado, alisson.rocha@pucpr.br¹⁻²

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG 38.400-089, Brasil.

² Graduate Program in Mechanical Engineering, Pontifical Catholic University of Paraná, Av. Imaculada Conceição 1155, Prado Velho Curitiba, PR, CEP: 80.215-901

Abstract: *The presence of residual stresses in engineering components can significantly affect the fracture strength, fatigue life and their ability to withstand loading. Residual stresses can be introduced deliberately or accidentally during the different manufacturing processes. In face milling of nickel alloys, compressive and tensile residual stresses may be introduced into the surface of the material implying in increasing or decreasing of the fatigue life and resistance to crack formation. Considering that nickel is a noble material and usually applied to components of the aeronautical area, where failure in service should be avoided at all costs, to preserve human lives, this work proposes to study the behavior of the residual stresses induced in the surface of the workpiece after machining in several conditions. Milling tests were carried out on Inconel 718 under roughing and finishing conditions with new and worn carbide tools and the residual stresses were measured by X-ray diffraction. In general, compressive stresses were obtained for new tools and residual tensile stresses for worn tools, near the end of their lives.*

Keywords: *Inconel 718, Cemented carbide Tool, Face milling, Residual Stresses.*