

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 06/01/2019.

**unesp**  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**CLEVERSON PINHEIRO**

**AVALIAÇÃO DA USINAGEM DO INCONEL 718 VIA METODOLOGIA  
DE TAGUCHI**

Guaratinguetá  
2018

**CLEVERSON PINHEIRO**

**AVALIAÇÃO DA USINAGEM DO INCONEL 718 VIA METODOLOGIA  
DE TAGUCHI**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do  
Campus de Guaratinguetá, Universidade  
Estadual Paulista, para a obtenção do título de  
Doutor em Engenharia Mecânica na área de  
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro  
Co-orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

Guaratinguetá  
2018

P654a Pinheiro, Cleverson  
Avaliação da usinagem do inconel 718 via metodologia de Taguchi /  
Cleverson Pinheiro – Guaratinguetá, 2018  
202 f. : il.  
Bibliografia: f. 193-202

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Engenharia de Guaratinguetá, 2018.  
Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro  
Coorientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

1. Usinagem. 2. Ferramentas de corte. 3. Taguchi, Métodos (Controle  
de qualidade). 4. Cerâmica (Tecnologia) I. Título

CDU 621.9(043)

  
Pâmella Benevides Gonçalves  
Bibliotecária/CRB-8 9203

CLEVERSON PINHEIRO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"


PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: MATERIAIS


APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. Ana Paula Roselli Alves Claro  
Coordenadora


**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO  
Orientador / UNESPTEG

  
Prof. Dr. JOSÉ VITOR CÂNDIDO DE SOUZA  
UNESPTEG

  
Prof. Dr. SÉRGIO FRANCISCO DOS SANTOS  
UNESPTEG

  
Prof. Dr. AMAURI HASSUI  
UNICAMP

  
Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES  
USP/São Carlos

Julho 2018

## **DADOS CURRICULARES**

### **CLEVERSON PINHEIRO**

NASCIMENTO	19.06.1983 – ITARARÉ / SP
FILIAÇÃO	Vicente Pinheiro Ivonete Marques Pinheiro
2004/2008	Curso de Graduação em Engenharia Industrial Madeireira – Universidade Estadual Paulista.
2012/2014	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2014/2018	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

De modo especial, à minha esposa Simone Simões  
Amaral, que é minha inspiração e grande incentivadora.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte de amor, vida e dons. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Ao meu orientador e amigo, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* que acreditou no meu trabalho e aceitou me orientar.

Ao meu coorientador e amigo, *Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves* que sempre me orientou e incentivou para que eu pudesse fazer o melhor trabalho.

À empresa Seco Tools, pelo apoio à pesquisa e fornecimento das ferramentas de estudo.

À empresa Villares Metals S.A, pelo fornecimento do material utilizado nos testes.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo suporte financeiro.

Ao professor *Dr. José Vitor Candido de Souza* – FEG/UNESP– Departamento de Materiais e Tecnologia, pela parceria e todo compartilhamento de conhecimento.

Ao professor *Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein* – FEG/UNESP – Departamento de Materiais e Tecnologia, pelo apoio na preparação das amostras para os ensaios de microdureza e obtenção de imagens das ferramentas no MEV.

Ao amigo *Renann Pereira Gama*, pela disponibilidade e apoio nos procedimentos de corte, embutimento, lixamento, ataque químico e análise da microestrutura em microscópio da amostra de Inconel 718.

Ao amigo *Maurício de Oliveira Filho*, pela disponibilidade e apoio no corte em eletroerosão e preparo da amostra para os ensaios de microdureza.

Ao amigo *Reginaldo Toshihiro Konatu*, pela disponibilidade e apoio na preparação da amostra, utilizando corte em disco diamantado, para os ensaios de microdureza.

Ao amigo *Marcel Yuzo Kondo* pela parceria e todo o apoio com os programas em *LabView* e *Matlab* e apoio nos ensaios de usinagem e outros procedimentos de laboratório.

Ao técnico *José Manoel Bernardes* – FEG/UNESP – Departamento de Materiais e Tecnologia, pelo apoio nos procedimentos de ensaio em usinagem e programação do centro de torneamento.

Aos colegas, professores e técnicos do *Campus* da UNESP de Guaratinguetá, que contribuíram para o bom andamento e conclusão deste estudo.

Aos professores titulares e suplentes nas bancas de qualificação e defesa da tese: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro (orientador) – FEG/Departamento de Materiais e Tecnologia; Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves (co-orientador) – FEG/Departamento



de Materiais e Tecnologia; Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza – FEG/ Departamento de Materiais e Tecnologia; Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira – FEG/ Departamento de Materiais e Tecnologia; Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento – FEG/ Departamento de Materiais e Tecnologia; Prof. Dr. Sérgio Francisco dos Santos – FEG/ Departamento de Materiais e Tecnologia; Prof. Dr. Amauri Hassui – UNICAMP/ Departamento de Engenharia Mecânica; Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues – USP/ Departamento de Engenharia Mecânica; Prof. Dr. João Roberto Ferreira – UNIFEI/ Instituto de Engenharia de Produção e Gestão; Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva – UFU/ Departamento de Engenharia Mecânica.

A todas as pessoas, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

"Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível e, de repente, você estará fazendo o impossível."

São Francisco de Assis

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

SECO TOOLS – com a doação da inserto utilizada neste trabalho.

VILLARES METALS – com a doação do INCONEL 718.

PINHEIRO, C. **Avaliação da usinagem do inconel 718 via metodologia de Taguchi**. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

## RESUMO

Apesar de ser amplamente utilizado em componentes aeroespaciais, o Inconel 718 apresenta algumas características que dificultam a sua usinagem: dureza elevada, resistência em altas temperaturas, forte afinidade para reagir com materiais de ferramentas e baixa condutividade térmica. Além do mais, esta liga possui tendência para a formação da aresta postiça de corte, endurecimento por deformação, assim como efeito abrasivo de carbonetos e fases intermetálicas, que resultam em tensões mecânicas e térmicas elevadas na aresta de corte. A qualidade de acabamento exigido pela indústria, para este material, é de  $1,6 \mu\text{m}$  de rugosidade média ( $R_a$ ) e  $6 \mu\text{m}$  de rugosidade total ( $R_t$ ). Sabendo da importância do Inconel 718, assim como da necessidade de conciliar os desafios de usinagem com a qualidade exigida, o objetivo deste trabalho foi encontrar a condição experimental que resulte em melhores resultados de usinagem. Para encontrar a condição ótima, a liga foi usinada utilizando duas ferramentas: experimental de cerâmica –  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$  (perfil S) e comercial de metal duro revestido (perfil C). Com a metodologia de Taguchi foram planejadas duas matrizes experimentais. Para a ferramenta cerâmica, a usinagem ocorreu a seco e nas seguintes condições: avanços de  $0,10\text{--}0,20\text{--}0,30 \text{ mm/rev}$ ; velocidades de corte de  $300\text{--}400\text{--}500 \text{ m/min}$ ; profundidades de usinagem de  $0,20\text{--}0,35\text{--}0,50 \text{ mm}$ . A ferramenta de metal duro revestido foi utilizada em profundidade fixa de  $0,5 \text{ mm}$ , nas seguintes condições experimentais: avanços de  $0,10\text{--}0,15\text{--}0,20\text{--}0,25 \text{ mm/rev}$ ; velocidades de corte de  $55\text{--}70\text{--}85\text{--}100 \text{ m/min}$ ; dois tipos de ferramentas; dois tipos de lubrificação/refrigeração. A melhor condição experimental, em ambos os planejamentos, foi definida a partir das seguintes variáveis reposita:  $R_a$ ,  $R_t$ , potência consumida, emissão acústica, vibração, desgaste da ferramenta e cavacos gerados. Para a ferramenta cerâmica, a condição que apresentou os melhores resultados foi: avanço de  $0,10 \text{ mm/rev}$ , velocidade de corte de  $400 \text{ m/min}$  e profundidade de  $0,50 \text{ mm}$ . Nesta condição, o comprimento de corte foi de  $326,77 \text{ m}$  e os valores de rugosidades, iniciais e finais, foram de:  $R_a = 0,798$  e  $2,075 \mu\text{m}$  e  $R_t = 6,227$  e  $13,88 \mu\text{m}$ , respectivamente. Para a ferramenta de metal duro revestido, a condição que apresentou os melhores resultados foi: avanço de  $0,10 \text{ mm/rev}$ , velocidade de corte de  $70 \text{ m/min}$ , ferramenta CNMG120408–M1– TS2500 e lubrificação/refrigeração com mínima quantidade de fluido. O comprimento de corte, nesta condição, foi de  $511,20 \text{ m}$ , cujos valores de rugosidades, iniciais e finais, foram de:  $R_a = 0,637$  e  $0,857 \mu\text{m}$  e  $R_t = 3,316$  e  $4,687 \mu\text{m}$ , respectivamente. A usinagem com a ferramenta de metal duro obteve um comprimento de corte  $36 \%$  maior que a ferramenta cerâmica, além de manter as rugosidades  $R_a$  e  $R_t$  dentro dos limites aceitos pelas indústrias aeroespaciais. Entretanto, a utilização da ferramenta cerâmica, usinando com velocidade de corte seis vezes maior que a ferramenta de metal duro, pareceu ser promissora, pois obteve valores semelhantes de: rugosidades  $R_a$  e  $R_t$ , até um comprimento de corte de  $170 \text{ m}$ ; desgastes de flancos médios semelhantes, até um comprimento de corte de aproximadamente  $250 \text{ m}$ ; valores inferiores de potência consumida; valores semelhantes de vibração; gerou cavacos curtos. Possivelmente, o emprego de ferramenta cerâmica redonda, com maior raio de ponta, possa gerar resultados melhores que aquelas de formato quadrado. Além do mais, o emprego desta ferramenta pode ser mais adequado em operações de desbaste com maiores profundidades de usinagem.

**Palavras chave:** Ferramenta cerâmica, Inconel 718, carboneto de tungstênio revestido.

PINHEIRO, C. **Evaluation of the machining of Inconel 718 via methodology of Taguchi.** 204 f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) – Engineering College of *Campus* of Guaratingueta, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Guaratingueta, 2018.

## ABSTRACT

Despite being widely used in aerospace components, the Inconel 718 presents some characteristics that make difficult its machining: high hardness, resistance at high temperatures, strong affinity to react with tools materials and low thermal conductivity. Moreover, this alloy has a tendency to form the built up edge, hardening by deformation, as well as the abrasive effect of carbides and intermetallic phases, which result in high mechanical and thermal tensions in the cutting edge. The surface finishing quality required by the industry, for this material, is  $1.6 \mu\text{m}$  of average roughness ( $R_a$ ) and  $6 \mu\text{m}$  of total roughness ( $R_t$ ). Knowing the importance of Inconel 718, as well as the need to combine the machining challenges with the required quality, the objective of this work was to find the experimental condition that results in better machining results. To find the optimal condition, the alloy was machined using two tools: experimental ceramic –  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$  (profile S) and commercial coated tungsten carbide (profile C). With Taguchi methodology, two experimental matrices were planned. For the ceramic tool, the machining occurred in the dry and under the following conditions: feed rates of 0.10–0.20–0.30 mm/rev; cutting speeds of 300–400–500 m/min; machining depths of 0.20–0.35–0.50 mm. The coated carbide tool was employed at a fixed machining depth of 0.5 mm, under the following experimental conditions: feed rates of 0.10–0.15–0.20–0.25 mm/rev; cutting speeds of 55–70–85–100 m/min; two types of tools; two types of lubrication/cooling. The best experimental condition, in both experimental designs, was defined from the following variables:  $R_a$ ,  $R_t$ , power consumed, acoustic emission, vibration, tool wear and chips. For the ceramic tool, the condition with the best results was: feed rate of 0.10 mm/rev, cutting speed of 400 m/min and depth of 0.50 mm. In this condition, the cut length was 326.77 m and the initial and final roughness values were:  $R_a = 0.798$  and  $2.075 \mu\text{m}$  and  $R_t = 6.227$  and  $13.88 \mu\text{m}$ , respectively. For the coated carbide tool, the condition that presented the best results was: feed rate of 0.10 mm/rev, cutting speed of 70 m/min, tool of CNMG120408–M1– TS2500 and lubrication/cooling with minimum amount of fluid. The cut length, in this condition, was 511.20 m, whose initial and final roughness values were:  $R_a = 0.637$  and  $0.857 \mu\text{m}$  and  $R_t = 3.316$  and  $4.687 \mu\text{m}$ , respectively. The machining with the coated carbide tool obtained a cutting length 36% higher than the cutting length obtained with the ceramic tool, besides maintaining the roughness  $R_a$  and  $R_t$  within the limits accepted by the aerospace industries. However, the use of the ceramic tool, with a cutting speed six times higher than the coated carbide tool, seemed to be promising, since it obtained similar values of roughness  $R_a$  and  $R_t$ , for a cut length of 170 m; similar average flank wear, for a cut length of about 250 m; lower values of power consumed; similar values of vibration; short chips generation. It is possible that the use of round ceramic tool, with larger tool radius, can produce better results than those of square format. Moreover, the use of this tool may be more suitable in roughing operations with higher machining depths.

**Keywords:** Ceramic tool, Inconel 718, coated tungsten carbide.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das superligas.....	30
Figura 2 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte. ....	37
Figura 3 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte. ....	38
Figura 4 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte...39	
Figura 5 – Desgaste de flanco em ferramenta de metal duro revestido com (TiAl)N+TiN pelo processo de PVD. ....	39
Figura 6 – Desgaste de cratera em ferramenta de metal duro revestido com (TiAl)N+TiN pelo processo de PVD. ....	40
Figura 7 – Desgaste de entalhe.....	41
Figura 8 – Quebra da ferramenta em cerâmica de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MgO.....	41
Figura 9 – Avaria por lascamento em ferramenta cerâmica de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MgO. ....	42
Figura 10 – Avaria causada por trincas térmicas.....	43
Figura 11 – Avaria causada por deformação plástica.....	43
Figura 12 – Mecanismos e processos de desgaste que podem ocorrer nas ferramentas de corte. ....	44
Figura 13 – Diagrama dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura.....	44
Figura 14 – Desgaste por aderência, presença de aresta postiça de corte. ....	45
Figura 15 – Grandezas relativas ao cavaco para arestas de corte retilíneas. ....	50
Figura 16 – Mecanismo de formação de cavacos.....	51
Figura 17– Tipos de cavacos. ....	52
Figura 18 – Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais. ....	53
Figura 19 – Classificação da integridade superficial de peças usinadas. ....	57
Figura 20 – Algumas formas de medição dos parâmetros de rugosidade. ....	59
Figura 21 – Forças de usinagem e suas componentes para o processo de torneamento. ....	66
Figura 22 – Transdutor de corrente com núcleo partido, envolvendo o acabo de alimentação do motor do centro de torneamento. ....	69
Figura 23 – Exemplo de um gráfico para análises em relação às médias. ....	76
Figura 24 – (a) Centro de Torneamento CNC (Romi GL240M), (b) Dispositivo para aplicação do MQF, Accu-Lube.....	92
Figura 25 – Detalhes do dispositivo para aplicação do MQF, Accu-Lube, da empresa <i>ITW chemical</i> .....	93

Figura 26 – Reservatório do equipamento Accu-lube com papel milimetrado formando coluna de medição.....	94
Figura 27 – Posicionamento do bico aspersor de MQF. ....	94
Figura 28 – Sistema de aquisição de dados: (a) computador utilizado na aquisição de dados (detalhe tela supervisorio do software <i>Labview</i> , (b) Módulo de canais com cabos de ligação com os sensores. ....	95
Figura 29 – (a) Sensor de vibração ( <i>Vibro Control</i> , modelo TV 100), com o cabo de conexão com o módulo de canais, (b) suporte envolvendo o corpo do porta-ferramentas. ....	96
Figura 30 – (a) Sensor de emissão acústica R15A, (b) suporte envolvendo o corpo do porta-ferramentas. ....	97
Figura 31 – Amplificador de sinal 1272-1000.....	97
Figura 32 – Transdutor de corrente com núcleo partido, marca LEM AT100 B10, conectado no condutor de energia. ....	98
Figura 33 – Rugosímetro portátil da marca <i>Mahr</i> modelo (a) <i>MarSurf</i> M300 e (b) <i>MarSurf</i> RD 18.....	99
Figura 34 – Microscópio óptico de medição ( <i>Mahr</i> MM200).....	99
Figura 35 – Microscópio modelo <i>Stemi</i> 2000 da marca <i>Zeiss</i> . ....	100
Figura 36 – Microscópio eletrônico de varredura da marca <i>Zeiss</i> , modelo EVO LS15.....	101
Figura 37 – <i>EDS Oxford-Instruments</i> , modelo INCA x-act.....	101
Figura 38 – Detalhes da preparação da amostra para o ensaio de microdureza. a) retirada a amostra triangular b) amostra triangular embutida, c) pano de polimento no prato da politriz e d) politriz semiautomática rotativa <i>Minimet</i> 1000. ....	102
Figura 39 – a) Microdurômetro <i>Wilson</i> , modelo 401 MVD, b) medição da dureza da amostra. ....	103
Figura 40 – Microscópio da marca <i>NIKON</i> , modelo <i>EPIPHOT</i> 200.....	104
Figura 41 – Insertos de metal duro recoberto com (TiAl)N+TiN pelo processo de recobrimento PVD.....	104
Figura 42 – Insertos de metal duro recoberto com (TiAl)N+TiN pelo processo de recobrimento PVD.....	105
Figura 43 – Inseto cerâmica de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MgO. ....	105
Figura 44 – Dimensões iniciais do corpo de prova <i>Inconel</i> 718; b) Microestrutura do <i>Inconel</i> 718.....	107
Figura 45 – Corpo de prova fixado na placa de três castanhas do torno (ferramenta de metal duro revestido).....	108

Figura 46 – Corpo de prova preso na placa de três castanhas do torno (ferramenta cerâmica). .....	109
Figura 47 – Efeitos dos fatores de entrada, sobre as médias de rugosidade ( $R_a$ ). .....	114
Figura 48 – Efeitos dos fatores de entrada, sobre as médias de rugosidade ( $R_t$ ).....	115
Figura 49 – Efeitos dos fatores de entrada, sobre as médias da potência consumida. ....	116
Figura 50 – Efeitos dos fatores de entrada, sobre as médias de vibração.....	118
Figura 51 – Efeitos dos fatores sobre as médias de emissão acústica. ....	119
Figura 52 – Efeitos dos fatores de entrada, sobre as médias de desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte.....	120
Figura 53 – Imagem gerada no microscópio modelo Stemi 2000, detalhando a ponta da ferramenta CNMG120408–MF1, TS2000. $v_c = 85$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, lubrificação MQF e $a_p = 0,5$ mm. a), b) e c) repetições, vista lateral direita, observando a aresta secundária de corte; d) vista frontal da ponta da ferramenta (repetição 3). ....	129
Figura 54 – Imagem gerada no MEV (detector VPSE) detalhando a ponta da ferramenta CNMG120408–MF1, TS2000. $v_c = 85$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, lubrificação MQF e $a_p = 0,5$ mm.....	130
Figura 55 – Imagem gerada no MEV (detector BSD ) detalhando a ponta da ferramenta CNMG120408–MF1, TS2000. $v_c = 85$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, lubrificação MQF e $a_p = 0,5$ mm.....	130
Figura 56 – Imagem gerada no MEV (detector EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva) detalhando a presença dos elementos (Ti, Cr, Ni e W) na ponta da ferramenta CNMG120408– MF1, TS2000. $v_c = 85$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, lubrificação MQF e $a_p = 0,5$ mm. ....	131
Figura 57 – Imagem detalhando: a), b) e c) formas do cavaco para as 3 repetições do ensaio; Imagem geradas no microscópio modelo Stemi 2000, detalhando o tipo de cavaco gerado após a usinagem com a ferramenta CNMG120408–MF1, TS2000. $v_c = 85$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, lubrificação MQF e $a_p = 0,5$ mm. ....	132
Figura 58 – Imagem gerada no microscópio modelo Stemi 2000, detalhando a ponta da ferramenta CNMG120408–M1, TS2500, $v_c = 85$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev, lubrificação MQF e $a_p = 0,5$ mm. a) vista lateral direita, observando a aresta secundária de corte, b) vista frontal da ponta da ferramenta (repetição 3). ....	133
Figura 59 – Imagem gerada no MEV (detector VPSE – Detector de Elétrons Secundários de Pressão Variável) detalhando a ponta da ferramenta CNMG120408–M1, TS2500, $v_c = 85$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev, lubrificação MQF e $a_p = 0,5$ mm.....	133



Figura 60 – Imagem gerada no MEV (detector BSD – Detector de elétrons retroespalhados) detalhando a ponta da ferramenta CNMG120408–M1, TS2500, $v_c = 85$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev, lubrificação MQF e $a_p = 0,5$ mm. ....	134
Figura 61 – Imagem gerada no MEV (detector EDS) detalhando a presença dos elementos (Ti, Cr, Ni e W) na ponta da ferramenta CNMG120408–M1, TS2500. $v_c = 85$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev, lubrificação MQF e $a_p = 0,5$ mm. ....	134
Figura 62 – Imagem detalhando: a) as formas, b) e c) Imagem aumentada em 20 vezes no Microscópio modelo Stemi 2000, detalhando o tipo de cavaco gerado após a usinagem com a ferramenta CNMG120408–M1, TS2500. $v_c = 85$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev, lubrificação MQF e $a_p = 0,5$ mm. ....	135
Figura 63 – Imagens detalhando, em diferentes posições, o desgaste final de uma ferramenta de corte, utilizada nos ensaios de vida da ferramenta.....	139
Figura 64 – Sequência demonstrando os cavacos gerados, valores do desgaste ( $VB_B$ ) da ferramenta e os valores das rugosidades $R_a$ e $R_t$ para cada trecho de 36 mm.....	140
Figura 65 – Análise de regressão entre rugosidade $R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) e desgaste de flanco médio (mm), no ensaio da vida da ferramenta CNMG120408–M1, TS2500, na condição: velocidade de corte de 70 m/min, avanço de 0,10 mm/rev, profundidade de usinagem de 0,50 mm e lubrificação MQF. ....	141
Figura 66 – Análise de regressão entre rugosidade $R_t$ ( $\mu\text{m}$ ) e desgaste de flanco médio (mm), no ensaio da vida da ferramenta CNMG120408–M1, TS2500, na condição: velocidade de corte de 70 m/min, avanço de 0,10 mm/rev, profundidade de usinagem de 0,50 mm e lubrificação MQF. ....	142
Figura 67 – Gráfico de linha para a visualização do efeito de aumento e redução da rugosidade $R_t$ com o desgaste $VB_B$ .....	143
Figura 68 – Análise de regressão entre potência consumida (W) e desgaste de flanco médio (mm), no ensaio da vida da ferramenta CNMG120408–M1, TS2500, na condição: velocidade de corte de 70 m/min, avanço de 0,10 mm/rev, profundidade de usinagem de 0,50 mm e lubrificação MQF. ....	144
Figura 69 – Análise de regressão entre a vida da ferramenta (min.) e desgaste de flanco médio (mm), no ensaio da vida da ferramenta CNMG120408–M1, TS2500, na condição: velocidade de corte de 70 m/min, avanço de 0,10 mm/rev, profundidade de usinagem de 0,50 mm e lubrificação MQF. ....	145
Figura 70 – Efeitos dos fatores de entrada, sobre as médias de rugosidade ( $R_a$ ). ....	147
Figura 71 – Efeitos dos fatores de entrada, sobre as médias de rugosidade ( $R_t$ ). ....	148

Figura 72 – Efeitos dos fatores sobre as médias de potência consumida. ....	149
Figura 73 – Efeitos dos fatores sobre as médias de vibração. ....	150
Figura 74 – Efeitos dos fatores sobre as médias de emissão acústica. ....	152
Figura 75 – Efeitos dos fatores sobre as médias de desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte. ....	153
Figura 76 – Imagem gerada no Microscópio modelo Stemi 2000, detalhando a ponta da ferramenta cerâmica, $v_c = 500$ m/min, $f = 0,30$ mm/rev, $a_p = 0,35$ mm e corte a seco. a) Tréplica dos ensaios, vista frontal, b) Réplica 3, maior desgaste medido. ....	160
Figura 77 – Imagem gerada no MEV (detector VPSE – Detector de Elétrons Secundários de Pressão Variável) detalhando a ponta da ferramenta cerâmica, $v_c = 500$ m/min, $f = 0,30$ mm/rev, $a_p = 0,35$ mm e corte a seco. ....	161
Figura 78 – Imagem realizada no MEV (detector BSD – Detector de elétrons retroespalhados) detalhando a ponta da ferramenta cerâmica, $v_c = 500$ m/min, $f = 0,30$ mm/rev, $a_p = 0,35$ mm e corte a seco. ....	162
Figura 79 – Imagem gerada no MEV (detector EDS) detalhando a presença dos elementos (Mg, Al, Ti, Cr e Ni) na ponta da ferramenta cerâmica, $v_c = 500$ m/min, $f = 0,30$ mm/rev, $a_p = 0,35$ mm e corte a seco. ....	163
Figura 80 – Imagem detalhando: a) as formas, b) Imagem aumentada em 20 vezes no Microscópio modelo Stemi 2000, detalhando o tipo de cavaco gerado após a usinagem com a ferramenta cerâmica, $v_c = 500$ m/min, $f = 0,30$ mm/rev, $a_p = 0,35$ mm e corte a seco. ....	164
Figura 81 – Imagem gerada no Microscópio modelo Stemi 2000, detalhando a ponta da ferramenta cerâmica, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,35$ mm e corte a seco. a) Tréplica dos ensaios, vista frontal, b) Réplica 1, menor desgaste medido. ....	165
Figura 82 – Imagem gerada no MEV (detector VPSE) detalhando a ponta da ferramenta cerâmica, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,35$ mm e corte a seco. ....	166
Figura 83 – Imagem gerada no MEV (detector BSD – Detector de elétrons retroespalhados) detalhando a ponta da ferramenta cerâmica, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,35$ mm e corte a seco. ....	166
Figura 84 – Imagem gerada no MEV (detector EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva) detalhando a presença dos elementos (Mg, Al, Ti, Cr e Ni) na ponta da ferramenta cerâmica, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,35$ mm e corte a seco. ....	167
Figura 85 – Imagem detalhando: a) as formas, b) Imagem aumentada em 20 vezes no Microscópio modelo Stemi 2000, detalhando o tipo de cavaco gerado após a usinagem com a ferramenta cerâmica, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,35$ mm e corte a seco. ....	168

Figura 86 – Acabamento obtido no ensaio de vida da ferramenta, utilizando a condição $f = 0,10$ mm/rev, $v_c = 400$ m/min e $a_p = 0,20$ mm. ....	170
Figura 87 – a) Imagem detalhando o desgaste da ferramenta cerâmica após o ensaio de vida, para a condição: $v_c = 400$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev, $a_p = 0,50$ mm e corte a seco. ....	172
Figura 88 – Cavacos e valores médios $VB_B$ , $R_a$ e $R_t$ , para as réplicas do ensaio de vida da ferramenta. ....	174
Figura 89 – Análise de regressão entre rugosidade $R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) e desgaste de flanco médio (mm), no ensaio da vida da ferramenta cerâmica. ....	176
Figura 90 – Análise de regressão entre rugosidade $R_t$ ( $\mu\text{m}$ ) e desgaste de flanco médio (mm), no ensaio da vida da ferramenta cerâmica. ....	177
Figura 91 – Análise de regressão entre potência consumida (W) e desgaste de flanco médio (mm), no ensaio da vida da ferramenta cerâmica. ....	178
Figura 92 – Análise de regressão entre vida da ferramenta (min.) e desgaste de flanco médio (mm), no ensaio da vida da ferramenta cerâmica. ....	179
Figura 93 – Dureza abaixo da superfície da peça usinada em função da distância de medição em relação à superfície usinada. Condição de usinagem: ferramenta cerâmica, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev, $a_p = 0,50$ mm e corte a seco ....	180
Figura 94 – Microestrutura do Inconel 718, após o ensaio de usinagem de vida com ferramenta cerâmica. Condição de usinagem: ferramenta cerâmica, $v_c = 400$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev, $a_p = 0,50$ mm e corte a seco. ....	181
Figura 95 – Comparação entre os valores de $R_a$ obtidos nos ensaios de vida das ferramentas de metal duro e ferramenta cerâmica, em função do comprimento de corte. ....	183
Figura 96 – Comparação entre os valores de $R_t$ obtidos nos ensaios de vida das ferramentas de metal duro e ferramenta cerâmica. ....	184
Figura 97 – Comparação entre os valores de vibração obtidos nos ensaios de vida das ferramentas de metal duro e ferramenta cerâmica. ....	185
Figura 98 – Comparação entre os valores de potência consumida obtidos nos ensaios de vida das ferramentas de metal duro e ferramenta cerâmica. ....	186
Figura 99 – Comparação entre os valores de desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) obtidos nos ensaios de vida das ferramentas de metal duro e ferramenta cerâmica. ....	187

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição química nominal da liga Inconel 718 segundo a especificação API (UNS N07718).....	32
Quadro 2 – Causas e ações para minimização de avarias e desgastes da ferramenta.....	47
Quadro 3 – Parâmetros de rugosidade $R_a$ e $R_t$ e suas definições. ....	58
Quadro 4 – Comprimentos de amostragem de rugosidade para medições de parâmetros R de perfis periódicos. ....	59
Quadro 5 – Classe S de metal duro.....	61
Quadro 6 – Características das ferramentas revestidas pelo processo PVD.....	63
Quadro 7– Exemplo de matrizes ortogonais internas e externas para o método de Taguchi. ..	75
Quadro 8 – Dados técnicos dos portas ferramentas e insertos utilizados.....	106
Quadro 9 – Matriz ortogonal de Taguchi, L16 ( $4^2 \times 2^2$ ), utilizada no planejamento experimental com ferramentas de metal duro revestido.....	110
Quadro 10 – Matriz ortogonal de Taguchi, L9 ( $3^3$ ), utilizada no planejamento experimental para os experimentos com ferramenta cerâmica.....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados médios ( $\bar{X}$ ) e desvios padrões ( $s$ ) de réplicas para as variáveis resposta: $R_a$ , $R_t$ , Potência consumida, Emissão acústica, Vibração e Desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte da ferramenta de metal duro. ....	113
Tabela 2 – Melhores combinações dos níveis das variáveis de entrada, para a condição “Menor é Melhor” de cada variável resposta. ....	122
Tabela 3– Análise de variância para as médias das respostas para o planejamento experimental com ferramentas de metal duro revestido. ....	123
Tabela 4 – Equações de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta $R_a$ . ....	125
Tabela 5 – Equações de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta $R_t$ . ....	126
Tabela 6 – Equações de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta potência consumida. ....	126
Tabela 7 – Equações de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta vibração. ....	127
Tabela 8 – Equações de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta emissão acústica (EA). ....	127
Tabela 9 – Equações de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta desgaste da ferramenta x 1000/comprimento de corte. ....	128
Tabela 10 – Ensaio de confirmação para a condição: ferramenta CNMG120408–M1, TS2500, $f = 0,10$ mm/rev, $v_c = 70$ m/min, lubrificação = MQF e $a_p = 0,5$ mm. ....	137
Tabela 11 – Resultados médios ( $\bar{X}$ ) e desvios padrões ( $s$ ) de réplicas para as variáveis resposta: $R_a$ , $R_t$ , Potência consumida, Emissão acústica e Desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte da ferramenta cerâmica. ....	146
Tabela 12 – Melhores combinações dos níveis das variáveis de entrada, para a condição “Menor é Melhor” de cada variável resposta. ....	155
Tabela 13 – Análise de variância para as médias das respostas para o planejamento experimental com ferramenta cerâmica. ....	156
Tabela 14 – Equação de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta $R_a$ . ....	157
Tabela 15 – Equação de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta $R_t$ . ....	158

Tabela 16– Equação de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta potência consumida. ....	158
Tabela 17 – Equação de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta vibração. ....	159
Tabela 18 – Equação de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta emissão acústica. ....	159
Tabela 19 – Equação de regressão linear e sua respectiva análise de variância, para a variável resposta desgaste da ferramenta/comprimento de corte. ....	159
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de confirmação para a condição: $f=0,10$ mm/rev, $v_c = 400$ m/min e $a_p = 0,20$ mm. ....	169

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	–	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANOVA	–	<i>Analysis Of Variance</i>
API	–	<i>American Petroleum Institute</i>
ASM	–	<i>American Society for Metals</i>
BUE	–	<i>Built Up Edge</i> = APC (Aresta Postiça de Corte)
CBN	–	Nitreto Cúbico de Boro
CFC	–	Cúbica de Face Centrada
CNC	–	Comando Numérico Computadorizado
CV	–	Coeficiente de Variação
CVD	–	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
DIN	–	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DP	–	Desvio Padrão
EA	–	Emissão Acústica
EDS	–	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
FEM	–	<i>Finite Element Method</i>
GL	–	Graus de Liberdade
HSM	–	<i>High Speed Machining</i>
ISO	–	<i>International Organization for Standardization</i>
M	–	Sistema da Linha Média
MQF	–	Mínima Quantidade de Fluido
MSQL	–	<i>Minimum Quantity of Solid Lubricant</i>
NBR	–	Norma Brasileira Registrada
PCD	–	<i>Polycrystalline Diamond</i>
PVD	–	<i>Physical Vapor Deposition</i>
RMS	–	<i>Root Mean Square</i>
SEM	–	<i>Scanning Electron Microscope</i> = MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)
S/N	–	<i>Signal/Noise</i>
SQ	–	Soma de Quadrados
SQM	–	Soma de Quadrados Médios
VPSE	–	<i>Variable Pressure Secondary Electron Detector</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta t$	tempo de integração	[s]
$A$	seção transversal de corte	[mm <sup>2</sup> ]
$a_e$	penetração de trabalho	[mm]
$a_p$	profundidade ou a largura de usinagem	[mm]
$b$	largura de corte	[mm]
$\cos \varphi$	fator de potência	–
$D$	diâmetro da peça	[mm]
$EA^2$	sinal puro de emissão acústica.	[RMS]
$EA_{RMS}$	valor médio quadrático de emissão acústica	[RMS]
$f$	avanço por rotação	[mm/rev]
$F$	distribuição F	adimensional
$F_c$	força de corte	[N]
$F_U$	força de usinagem	[N]
$h$	espessura de corte teórica do cavaco	[mm]
$h_1$	espessura do cavaco antes de formado	[mm]
$h_2$	espessura do cavaco depois de formado	[mm]
HRc	dureza <i>Rockwell</i> na escala C	[HRc]
HV	dureza <i>Vickers</i>	[HV]
$i$	corrente alternada de uma das fases	[A]
$k_{c1.1}$	pressão específica de corte para um cavaco com 1 mm <sup>2</sup>	[N. mm <sup>-2</sup> ]
$k_s$	pressão específica de corte	[N. mm <sup>-2</sup> ]
$KT$	profundidade da cratera	[mm]
$l_c$	comprimento de corte	[mm]
$l_f$	percurso de avanço	[mm]
$l_n$	comprimento de avaliação	[mm]
$l_r$	comprimento de amostragem	[mm]
$m_c$	expoente da pressão específica de corte	adimensional
Mex	metal de transição de grupos V–VI	–
$n$	rotação do eixo árvore	[rpm]
$n$	rotação do eixo árvore	adimensional
$\theta$	fase	[graus]
$\omega$	frequência angular	[Hz]
$p$	probabilidade p	adimensional



$P_{ap3F}$	potência aparente para motores trifásicos	[W]
$P_c$	potência de corte	[W]
$R^2$	coeficiente de determinação	adimensional
$R_a$	desvio aritmético médio	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_q$	desvio médio quadrático	[ $\mu\text{m}$ ]
$RSm$	largura média de um elemento do perfil	[mm]
$R_t$	altura total do perfil	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	altura máxima do perfil	[ $\mu\text{m}$ ]
$r_\epsilon$	raio de ponta da ferramenta	[mm]
$s$	desvios padrão	Depende da variável
$T$	vida da ferramenta de corte	[min.]
$U$	tensão de uma das fases	[V]
$U_{cc}$	tensão de corrente contínua	[V]
$VB$	desgaste de flanco	[mm]
$VB_B$	desgaste de flanco médio	[mm]
$VB_C$	desgaste de entalhe aresta secundária	[mm]
$VB_{máx.}$	desgaste de flanco máximo	[mm]
$VB_N$	desgaste de entalhe aresta principal	[mm]
$v_c$	velocidade de corte	[m.min <sup>-1</sup> ]
$v_f$	velocidade de avanço	[mm.min <sup>-1</sup> ]
$y$	valor da reposta de uma variável de saída	Depende da variável
$y_0$	amplitude de deslocamento	[mm]
$y_t$	valor instantâneo do deslocamento no instante t	[mm]
$\alpha$	nível de significância	adimensional
$\gamma_0$	ângulo de saída ortogonal	[graus]
$\gamma_{0\text{ efetivo}}$	ângulo de saída efetivo	[graus]
$\eta$	eficiência dos sistemas de transmissão entre os eixos dos motores e dos sistemas finais de entrega de potência	adimensional
$\lambda_s$	ângulo de inclinação	[graus]
$\phi$	ângulo de cisalhamento	[graus]
$\chi_r$	ângulo de posição	[graus]
$\bar{X}$	média de uma amostra ou população	Depende da variável

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>26</b>
1.1 OBJETIVOS .....	28
1.1.1 Objetivo geral .....	28
1.1.2 Objetivos específicos .....	28
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>30</b>
2.1 SUPER LIGAS DE NÍQUEL .....	30
2.1.1 Superliga Inconel 718 .....	31
2.1.2 Aspectos da usinagem das superligas de níquel .....	32
2.2 DESGASTE E AVARIAS EM FERRAMENTAS DE CORTE .....	36
2.2.1 Desgaste de flanco .....	39
2.2.2 Desgaste de cratera .....	40
2.2.3 Desgaste de entalhe .....	40
2.2.4 Quebra da ferramenta .....	41
2.2.5 Lascamento .....	42
2.2.6 Trincas .....	42
2.2.7 Deformação plástica .....	43
2.3 MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE .....	43
2.3.1 Aderência e arrastamento .....	45
2.3.2 Desgaste abrasivo .....	45
2.3.3 Desgaste por difusão .....	46
2.3.4 Desgaste de entalhe .....	46
2.3.5 Ações para minimização dos desgastes e avarias .....	46
2.4 VIDA DA FERRAMENTA .....	48
2.5 GRANDEZAS RELATIVAS AO CAVACO .....	49
2.6 MECANISMO DE FORMAÇÃO DO CAVACO .....	51
2.7 USINAGEM A SECO E LUBRIFICAÇÃO/REFRIGERAÇÃO EM USINAGEM .....	53
2.8 INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS USINADAS .....	57
2.8.1 Parâmetros para quantificação da rugosidade .....	58
2.8.2 Cálculo da rugosidade no processo de torneamento .....	60
2.9 MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE .....	60
2.9.1 Ferramentas de metal duro .....	60
2.9.2 Ferramentas cerâmicas .....	64
2.10 FORÇA E POTÊNCIA EM USINAGEM .....	66

<b>2.10.1 Determinação teórica da força e potência de corte</b> .....	67
<b>2.10.2 Medição da potência de corte</b> .....	68
2.11 EMISSÃO ACÚSTICA.....	69
2.12 VIBRAÇÃO .....	72
2.13 PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS – METODOLOGIA DE TAGUCHI... 73	
2.14 ESTUDOS RELEVANTES EM USINAGEM DE SUPERLIGAS DE NÍQUEL..... 77	
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>92</b>
3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	92
<b>3.1.1 Centro de torneamento e sistema de lubrificação</b> .....	92
<b>3.1.2 Sistema de aquisição de dados</b> .....	94
<b>3.1.3 Medidas de rugosidade da peça usinada</b> .....	98
<b>3.1.4 Imagens e medidas de desgaste dos insertos</b> .....	99
<b>3.1.5 Dureza da peça usinada</b> .....	101
<b>3.1.6 Revelação da microestrutura do material</b> .....	103
<b>3.1.7 Porta-ferramentas e ferramentas utilizadas</b> .....	104
3.2 MATERIAL DA PEÇA A SER USINADA .....	107
3.3 PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	108
<b>3.3.1 Ferramentas de metal duro revestido</b> .....	108
<b>3.3.2 Ferramenta cerâmica</b> .....	109
<b>3.3.3 Ensaios de confirmação e vida das ferramentas</b> .....	109
3.4 PROJETO DE EXPERIMENTOS .....	110
<b>3.4.1 Ferramentas de metal duro revestido</b> .....	110
<b>3.4.2 Ferramenta cerâmica</b> .....	111
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>112</b>
4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL COM FERRAMENTAS DE METAL DURO REVESTIDO .....	112
<b>4.1.1 Parâmetros de rugosidade (rugosidade média <math>R_a</math> e rugosidade total <math>R_t</math>)</b> .....	114
<b>4.1.2 Potência consumida</b> .....	116
<b>4.1.3 Vibração</b> .....	118
<b>4.1.4 Emissão acústica</b> .....	119
<b>4.1.5 Desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte</b> .....	120
4.2 ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL COM FERRAMENTAS DE METAL DURO REVESTIDO .....	124

4.3	DESGASTE DAS FERRAMENTAS E CAVACOS GERADOS NA USINAGEM DO INCONEL 718, COM FERRAMENTAS DE METAL DURO REVESTIDO.....	128
4.4	ENSAIOS DE CONFIRMAÇÃO E DE VIDA DA FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDO, PARA AS MELHORES CONDIÇÕES.....	136
4.5	RESULTADOS REFERENTES AO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL COM FERRAMENTAS CERÂMICA, CONFORME A METODOLOGIA DE TAGUCHI.....	145
<b>4.5.1</b>	<b>Parâmetros de rugosidade (rugosidade média <math>R_a</math> e rugosidade total <math>R_t</math>) .....</b>	<b>147</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Potência consumida .....</b>	<b>149</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Vibração .....</b>	<b>150</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Emissão acústica .....</b>	<b>152</b>
<b>4.5.5</b>	<b>Desgaste da ferramenta em relação ao comprimento de corte.....</b>	<b>153</b>
4.6	ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA REFERENTE AO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL COM FERRAMENTA CERÂMICA.....	157
4.7	DESGASTE DAS FERRAMENTAS E CAVACOS GERADOS REFERENTES AO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL COM FERRAMENTA CERÂMICA.....	160
4.8	ENSAIOS DE CONFIRMAÇÃO E VIDA DA FERRAMENTA CERÂMICA, PARA AS MELHORES CONDIÇÕES.....	168
4.9	ENSAIOS DE MICRODUREZA ABAIXO DA SUPERFÍCIE USINADA, APÓS OS ENSAIOS DE VIDA DA FERRAMENTA CERÂMICA .....	179
4.10	ENSAIOS PARA REVELAÇÃO DA MICROESTRUTURA ABAIXO DA SUPERFÍCIE USINADA, APÓS OS ENSAIOS DE VIDA DA FERRAMENTA CERÂMICA .....	181
4.11	COMPARAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DE VIDA PARA AS FERRAMENTAS DE METAL DURO E CERÂMICA.....	182
4.12	RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS .....	187
<b>4.12.1</b>	<b>Para o torneamento com as ferramentas de metal duro (CNMG120408–MF1, TS2000 e CNMG120408–M1, TS2500) revestida com (TiAl)N+TiN .....</b>	<b>187</b>
<b>4.12.2</b>	<b>Para o torneamento com a ferramenta cerâmica de <math>Al_2O_3 + MgO</math> .....</b>	<b>189</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>191</b>
<b>6</b>	<b>INDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>192</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>193</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com margens de lucro cada vez menores, as indústrias de transformação percebem a incontestável necessidade de desenvolvimento de novas técnicas para melhorar os processos de fabricação e conseqüentemente diminuir os seus custos. Para o processo de usinagem, existe uma busca incessante por ferramentas de corte que possam gerar produtos de qualidade com menor custo possível. Com isto, as empresas necessitam gerenciar seus processos de maneira que possam aproveitar ao máximo o potencial de cada inserto utilizado, sem se esquecerem do uso de métodos que possam reduzir os impactos à saúde das pessoas e ao meio ambiente.

Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2013), a máxima utilização de cada inserto fica dificultada no meio industrial, pois o monitoramento dos desgastes e conseqüentemente da vida da ferramenta tem ficado o cargo do operador, e este, na maioria das vezes, sem treinamento e sem técnicas de acompanhamento da vida da ferramenta, acaba, de maneira bem conservadora, trocando a ferramenta antes do fim de sua vida, gerando desperdício. Segundo os autores, a solução estaria no monitoramento indireto do desgaste da ferramenta utilizando sensores de vibração, de emissão acústica, de parâmetros elétricos da máquina ou de força de usinagem, juntamente com o melhor preparo e treinamento do operador.

As indústrias fabricantes de ferramentas de usinagem de metais estão focadas em desenvolver novos materiais para a obtenção de ferramentas que atendam às solicitações de usinagem das chamadas superligas. A aquisição destas ferramentas se torna inacessível para pequenas e médias empresas do ramo de usinagem, além do fato que a utilização de ferramentas avançadas existe ainda a necessidade de centros de usinagem que possuam uma maior rigidez.

Vários estudos tem sido realizados com o objetivo de otimizar o processo de usinagem de superligas utilizadas em aplicações de alta solicitação, tanto de resistência mecânica em elevadas temperaturas, como de resistência à corrosão. As ligas de níquel são umas das que apresentam grande importância nas pesquisas, devido a suas propriedades únicas que atendem a estes requisitos.

Zeilmann, Fontanive e Soares (2017) comentam que a crescente demanda por produtos resistentes a condições ambientais de elevada solicitação tem estimulado muitas pesquisas, com o objetivo de melhorar as propriedades dos materiais, otimizar seu processamento e facilitar suas aplicações. Entre os metais mais utilizados em condições que exigem resistência

a elevadas temperaturas e resistência a corrosão, estão as superligas de níquel, em particular o Inconel 718. Entretanto, as mesmas propriedades térmicas, mecânicas e metalúrgicas, que tornam o Inconel 718 um material de grande aplicabilidade, também fazem com que ele seja um material de baixa usinabilidade.

Dificuldades encontradas na usinagem de superligas, associadas à necessidade de obtenção de componentes com adequado acabamento superficial e dimensional, são um grande desafio.

Segundo Iturbe et al. (2016) os requisitos de rugosidade de estabelecidos pela indústria aeroespacial, para materiais que estarão sobre altas solicitações são atualmente, um  $R_t$  máximo de  $6 \mu\text{m}$  e um  $R_a$  máximo de  $=1,6 \mu\text{m}$ .

Para Zeilmann, Fontanive e Soares (2017), deve ser dada uma atenção especial para a utilização de processos de transformação ambientalmente seguros para a sociedade, porém as particularidades do processo de usinagem do Inconel 718 requerem tradicionalmente o uso de fluido de corte. Entretanto, a não utilização do fluido de corte pode resultar em benefícios para o meio ambiente, além de colaborar com a proteção da saúde do trabalhador. Segundo estes pesquisadores, um processo de transformação amigável ao meio ambiente deve compreender os estudos para o desenvolvimento de conhecimentos especializados em usinagem a seco, que podem resultar em mudanças técnicas significativas.

Segundo Pušavec, Krajnik e Kopač (2010), os fluidos de corte de metal alteram o desempenho das operações de usinagem por causa de suas funções de lubrificação e resfriamento, mas o uso de fluido de corte tornou-se mais problemático em termos de saúde dos funcionários e poluição ambiental. Para Shokrani et al. (2012) e Yildiz e Nalbant (2008), a mínima quantidade de fluido (MQF) é uma eficiente técnica de lubrificação/refrigeração, e ainda amigável ao meio ambiente.

De acordo com Devillez et al. (2007), o corte a seco pode ser a melhor opção sob o ponto de vista da não geração de fluido de corte residual, com base em razões ambientais e econômicas. A quantidade gasta na aquisição, no uso, disposição e limpeza do líquido refrigerante é significativa, e pode chegar até quatro vezes o valor das ferramentas de corte. Os líquidos de refrigeração são geralmente utilizados para eliminação de cavacos, melhoramento da precisão de usinagem, acabamento e extensão da vida das ferramentas, especialmente em condições agressivas de corte na ferramenta e na peça.

Apesar das tentativas de eliminar completamente os fluidos refrigerantes, em muitos casos a refrigeração ainda é essencial na obtenção de economia da vida das ferramentas e

qualidade superficial requerida. Isto é particularmente válido quando há exigência de tolerâncias estreitas, e alta precisão dimensional e de forma ou quando se trata de usinagem de materiais de corte difícil.

A principal contribuição deste trabalho está no estudo original da usinagem de acabamento à seco do Inconel 718, utilizando uma ferramenta cerâmica experimental com uma composição específica de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{MgO}$  que, segundo uma vasta busca na literatura, ainda não foi estudada para a usinagem de superligas de níquel.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo desta tese foi encontrar a condição experimental que resulte em melhores resultados de usinagem e comparar a ferramenta cerâmica experimental de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$  com ferramentas comerciais de metal duro revestido. A melhor condição experimental, para os melhores resultados, foi avaliada em termos das variáveis repostas: rugosidade das peças usinadas, potência consumida, emissão acústica, vibração, desgaste das ferramentas e cavacos gerados, no torneamento de acabamento do Inconel 718, em diferentes condições de usinagem.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar ensaios de usinagem, com as ferramentas de metal duro revestido e ferramenta cerâmica, conforme os planejamentos desenvolvimentos inicialmente com o auxílio da metodologia de Taguchi;
- Analisar o desgaste das ferramentas e cavacos gerados, para os ensaios que gerarem os maiores e menores valores de desgaste da ferramenta, em função do comprimento de corte para cada nova aresta de corte;
- Realizar estudos regressão linear múltipla entre as variáveis de entrada e variáveis resposta;
- Realizar ensaios de usinagem para a determinação da vida da ferramenta, para as melhores condições previstas pelos resultados dos planejamentos iniciais e confirmadas por ensaios de confirmação;

- Ajustar correlações entre rugosidade ( $R_a$  e  $R_t$ ), potência consumida na usinagem e o desgaste da ferramenta;
- Analisar os resultados de vida das ferramentas de metal duro e cerâmica, comparando as respostas para os parâmetros de rugosidade ( $R_a$  e  $R_t$ ), comprimento de corte, potência consumida, vibração e desgastes das ferramentas.



## 5 CONCLUSÃO

Para o torneamento com as ferramentas de metal duro revestidas com (TiAl)N+TiN:

- Melhor combinação:  $v_c = 70$  m/min.;  $f = 0,10$  mm/rev; ferramenta CNMG120408–M1, TS2500; lubrificação/refrigeração MQF;
- Comprimento de corte médio obtido foi de 511,20 m;
- Manteve até o final de sua vida, rugosidades, dentro dos limites aceitos pelas indústrias aeroespaciais ( $R_a$  e  $R_t$  máximos de 1,6  $\mu$ m e 6  $\mu$ m, respectivamente).

Para o torneamento com a ferramenta cerâmica de  $Al_2O_3 + MgO$ :

- Melhor combinação:  $v_c = 400$  m/min,  $f = 0,10$  mm/rev,  $a_p = 0,50$  mm;
- Comprimento de corte médio obtido foi de 337,18 m;

A ferramenta de metal duro obteve um comprimento de corte, 36 % superior à ferramenta cerâmica, além de manter, até o final de sua vida, rugosidades,  $R_a$  e  $R_t$ , dentro dos limites aceitos pelas indústrias, especialmente as aeroespaciais ( $R_a$  e  $R_t$  máximos de 1,6  $\mu$ m e 6  $\mu$ m, respectivamente). Entretanto, a utilização da ferramenta cerâmica de  $Al_2O_3 + MgO$ , mostra-se promissora, pois consegue praticamente obter os mesmos valores iniciais de acabamentos (até um comprimento de usinagem de aproximadamente de 170 m) e isto usinando com uma velocidade de corte quase seis vezes maior, com uma potência consumida inferior, aproximadamente de 700 W, com valores semelhantes de vibrações e sem nenhuma quebra. É possível que em operações de desbaste com maiores profundidades de usinagem e um maior raio de ponta, talvez ferramentas redondas, seja uma aplicação mais adequada para a ferramenta cerâmica de  $Al_2O_3 + MgO$ .

## REFERÊNCIAS

ALTIN, A.; NALBANT, M.; TASKESEN, A. The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools. **Materials & Design**, v. 28, n. 9, p. 2518–2522, nov. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306906002561?via%3Dihub>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

AMINI, S.; FATEMI, M. H.; ATEFI, R. High Speed Turning of Inconel 718 Using Ceramic and Carbide Cutting Tools. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 3, p. 2323–2330, sept. 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s13369-013-0776-x>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

ARUNA, M.; DHANALAKSHMIS, M.; MOHAN, S. Wear Analysis Of Ceramic Cutting Tools In Finish Turning Of Inconel 718. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 2, n. 9, p. 4253–4262, 2010. Disponível em: <<http://jestec.taylors.edu.my/downloads.html>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

ARSHINOV, V.; ALEKSEEV, G. **Metal cutting theory and cutting tool design**. Moscow: Mir Publishers, 1970. 568 p.

ARUNACHALAM, R. M.; MANNAN, M. A.; SPOWAGE, A. C. Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 14, p. 1481–1491, nov. 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695504001270>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 6A718**: Specification of nickel base alloy 718 (uns N07718) for oil and gas drilling and production equipment. USA, 2004.

ASM METALS HANDBOOK. **Properties and selection - Nonferrous alloys and special-purpose materials**. 10. ed. USA: ASM International, 2004. 3470 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS)- Rugosidade: Método do perfil-Termos, definições dos parâmetros de rugosidade. Rio de Janeiro: 2002, 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4288**: Especificações geométricas do produto (GPS)- Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro: 2008, 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14725-2**: Produtos químicos- Informações sobre segurança, saúde e meio ambiente. Parte 2: Sistema de classificação de perigo. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT (NBR ISO 513)**: Classificação e aplicação de metais duros para usinagem com arestas de corte definidas – designação dos grupos principais e grupos de aplicação. Rio de Janeiro: 2013, 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT (NBR ISO 9361-1):** Insertos intercambiáveis para ferramentas de corte - insertos de cerâmica com cantos arredondados - parte 1: dimensões das insertos sem furo de fixação. Rio de Janeiro: 2016, 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT (NBR ISO 3685):** Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento, para ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmicas, apresenta os parâmetros utilizados para quantificar esses desgastes. Rio de Janeiro: 2016, 61 p.

AXINTE, D. A.; DEWES, R.C. Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling experimental data and empirical models. **Journal of Materials Processing Technology** 127, 325–335, oct. 2002.

BAYOUMI, A. E.; XIE, J. Q. Some metallurgical aspects of chip formation in cutting Ti6wt.%Al-4wt.%V alloy. **Materials Science & Engineering**, A190, p. 173–180, may.1995.

BARBOSA, C. Metais não Ferrosos e suas Ligas – Microestrutura, Propriedades e Aplicações. 1. Ed. Rio de Janeiro: **E–Papers**, 2014. 532 p.

DIETER, G.E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981. 347 p.

BEHERA, B. C. et al. Effects on forces and surface roughness during machining inconel 718 alloy using minimum quantity lubrication. In: ALL INDIA MANUFACTURING TECHNOLOGY, DESIGN AND RESEARCH CONFERENCE, 26., 2014, Guwahati. **Proceedings...** Guwahati: Aimtdr, 2014.

BHATTACHARYA, A.; DAS, S.; MAJUMDER, P.; BATISH, A. Estimating the effect of cutting parameters on surface finish and power consumption during high speed machining of AISI 1045 steel using Taguchi design and ANOVA. **Production Engineering Research and Development**. 3, 31-40, mar. 2009. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11740-008-0132-2>>. Acesso em: 01 fev. 2018.

BIKSA, A. et al. Wear behavior of adaptive nano-multilayered AlTiN/MexN PVD coatings during machining of aerospace alloys. **Tribology International**, v. 43, n. 8, p. 1491–1499, feb. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X10000514>>. Acesso em: 01 fev. 2018.

BONIFACIO, Marcos Eduardo Reis. **Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração**. 1993. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1993. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264220>>. Acesso em: 18 jul. 2018.

BRANDT, G. Flank and crater wear mechanisms of alumina-based cutting tools when machining steel. **Wear**, v. 112, n. 1, p. 39–56, feb. 1986. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164886901997?via%3Dihub>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

BRANDT, G.; GERENDAS, A.; MIKUS, M. Wear mechanisms of ceramic cutting tools when machining ferrous and non-ferrous alloys. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 6, n. 5, p. 273–290, apr. 1990. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095522199090019C?via%3Dihub>>. Acesso em: 19 mar. 2018.

BROOKS, C. R. **Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys**. Ohio: American Society for Metals, 1982. 420 p.

BYUN, T.S.; FARRELL, K. Tensile properties of Inconel 718 after low temperature neutron irradiation. **Journal of Nuclear Materials**, v. 318, p. 292-299, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311503000060>>. Acesso em: 19 mar. 2018.

CANTERO, J. L.; DÍAZ-ÁLVAREZ, J.; MIGUÉLEZ, M. H.; MARÍN, N. C. Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718. **Wear**, v. 297, n. 1–2, p. 885–894, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164812003420?via%3Dihub>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

CHILDS, T. et al. **Metal machining - Theory and applications**. London: Arnold, 2001. 416p.

CHOUDHURY, I. .; EL-BARADIE, M. . Machinability of nickel-base super alloys: a general review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 77, n. 1–3, p. 278–284, 1998. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013697004299?via%3Dihub>>. Acesso em: 19 mar. 2018.

CHOUDHURY, I. A.; EL-BARADIE, M.A. Machinability assessment of Inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology. **Journal of Materials Processing Technology**, v 95, p. 30–39, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013699000850>>. Acesso em: 19 mar. 2018.

DAVIM, J. P.; SREEJITH, P. S.; SILVA, J. Turning of brasses using minimum quantity of lubricant (MQF) and flooded lubricant conditions. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 22 (1), n. 1, p. 45-50, 2007. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426910601015881>>. Acesso em: 19 mar. 2018.

DEARNLEY, P. A.; TRENT, E. M. Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools. **Metals Technology**, vol.9, p. 60-75, 1982. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/030716982803285909>>. Acesso em: 19 mar. 2018.

DEVILLEZ, A. et al. Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 10, p. 1590–1598, 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013611001208>>. Acesso em: 16 jun. 2014.

DEVILLEZ, A. et al. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. **Wear**, v. 262, n. 7–8, p. 931–942, 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164806003553?via%3Dihub>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. **Journal of Quality Technology**, 12, 214-219, 1980. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00224065.1980.11980968>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L.; MARCONDES, F. C. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8 ed. São Paulo: Editora M.M, 2013.

DINIZ, A. E.; HARA, C. M. Using neural network to establish the end of turning tool life based on tool vibration signals. **Revista Ciência e Tecnologia**, v.7, n.14, p. 67-74, 1999.

DOLINŠEK, S.; KOPAČ, J. Acoustic emission signals for tool wear identification. **Wear**, v. 225–229, p. 295–303, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164898003639?via%3Dihub>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

DONG, G. et al. Study of cutting deformation in machining nickel-based alloy Inconel 718. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 6, p. 520–527, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695511000538>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

DOYLE, E. D.; HORNE, J. G.; TABOR, D. Frictional interactions between chip and rake face in continuous chip formation. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 366, p. 173–187, jun. 1979. Disponível em: <[https://www.jstor.org/stable/79797?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/79797?seq=1#page_scan_tab_contents)>. Acesso em: 14 mar. 2018.

DUDZINSKI, D. et al. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 4, p. 439–456, 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695503001597>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

EUZÉBIO, Carlos Danilo Gaioli. **Uma contribuição da aplicação de modelos fuzzy empregados na detecção da queima de peças na retificação plana**. 2011. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2011. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/96495/euzebio\\_csg\\_me\\_bauru.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/96495/euzebio_csg_me_bauru.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 14 mar. 2018.

EZUGWU, E. O. Key improvements in the machining of difficult to cut aerospace superalloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. 45(12–13):1353–1367, 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505000544>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M.; MACHADO, A. R. The machinability of nickel-based alloys: a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 86, n. 1–3, p. 1–16, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013698003148?via%3Dihub>>. Acesso em: 18 mai. 2018.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Jornal of materials processing technology**, n° 134, p. 233–253, 2003.

Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602010427>>. Acesso em: 18 mai. 2018.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M.; OKEKE, C. I. Tool Life and Surface Integrity When Machining Inconel 718 With PVD- and CVD-Coated Tools. **Tribology Transactions**, v. 42, n. 2, p. 353–360, 1999. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402009908982228>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

FAN, Y. et al. Study of surface quality in machining nickel-based alloy Inconel 718. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, n. 9–12, p. 2659–2667, 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-013-5225-1>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

FANG, N.; WU, Q. A comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti–6Al–4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 9, p. 4385–4389, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013608007607>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 796p.

GATTO, A.; IULIANO, L. Chip formation analysis in high speed machining of a nickel base superalloy with silicon carbide whisker-reinforced alumina. **International Journal Machine Tools Manufacturing**, v.34, n.8, p.1147-1161, 1994. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0890695594900191>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

GÓMEZ, M. P. et al. Assessment of Cutting Tool Condition by Acoustic Emission. **Procedia Materials Science**, v. 1, p. 321–328, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812812000442>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

GOVEKAR, E.; GRADIŠEK, J.; GRABEC, I. Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining processes. **Ultrasonics**, v. 38, n. 1–8, p. 598–603, 2000. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X99001262?via%3Dihub>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

GRZESIK, Wit. **Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, modelling, and applications**. 2<sup>a</sup> ed. Amsterdam: Elsevier, 2017. 608 p.

GRZESIK, W.; MAŁECKA, J. Documentation of tool wear progress in the machining of nodular ductile iron with silicon nitride-based ceramic tools. **CIRP Annals**, v. 60, n. 1, p. 121–124, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850611000849?via%3Dihub>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

HADAD, M.; SADEGHI, B. Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 332-343, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613003181>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

HAO, Z. P. et al. New observations on wear mechanism of self-reinforced SiAlON ceramic tool in milling of Inconel 718. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 17, n. 3, p. 467–474, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2016.12.011>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

HASSUI, Amauri. **Estudo de vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho**. 2002. 180f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/265602>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

IBRAHIM, G. A. et al. Performance of PVD-coated carbide tools when turning inconel 718 in dry machining. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2011, n. 0, p. 790975, 2011. Disponível em: <<http://ade.sagepub.com/lookup/doi/10.1155/2011/790975>>. Acesso em: 20 set. 2016.

ITURBE, A. et al. Surface Integrity Analysis when Machining Inconel 718 with Conventional and Cryogenic Cooling. **Procedia CIRP**, v. 45, p. 67–70, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116003772>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

JARRETA, D.D. et al. Análise crítica da base de dados de software de simulação numérica para conformação a quente da liga VAT@718, **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 5, n°1, p. 28-34, 2008. Disponível em: <<http://tecnologiamm.com.br/files/v5n1/v5n1a06.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2016.

KARPUSCHEWSKI, B. et al. Influence of tool edge preparation on performance of ceramic tool inserts when hard turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 11, p. 1978–1988, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013613001726?via%3Dihub>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

KAMATA, Y.; OBIKAWA, T. High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools. **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 192– 193, pp. 281-286, 2007. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2075-4701/8/3/192>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

KAYNAK, Y. Evaluation of machining performance in cryogenic machining of Inconel 718 and comparison with dry and MQL machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 5–8, p. 919–933, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-5683-0>>. Acesso em: 20 set. 2016.

KIENZLE, O., VICTOR, H.: **Die bestimmung von kräften und leistungen an spanenden werkzeugmaschinen**, :VDI-Z, 1952. 299 p.

KIVAK, T. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. **Measurement**, v. 50, p. 19–28, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224113006386>>. Acesso em: 20 set. 2016.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. Dry Cutting. **Manufacturing Technology**, v. 46, p. 519-526, 1997. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607608774>>. Acesso em: 20 set. 2016.

KLOCKE, F. et al. PVD-coated tools and native ester – an advanced system for environmentally friendly machining. **Surface and Coatings Technology**, v. 201, n. 7, p. 4389–4394, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897206008723?via%3Dihub>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

KOMANDURI, R.; TURKOVICH B.F. V. New observations on the mechanisms of chip formation when machining titanium alloys. **Wear**, v. 62, p. 179- 188. 1981. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164881902428>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

KONIG, W.; GERSCHWILER, K. Machining nickel-based superalloys. **Manufacturing Engineering**, v. 3, p. 102 – 108, 1999.

KOSE, E.; KURT, A.; SEKER, U. The effects of the feed rate on the cutting tool stresses in machining of Inconel 718. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 196, n. 1-3, p. 165–173, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607005390>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

KUO, C. M. et al. Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy. **Materials Science and Engineering A**, v. 510-511, p. 289-294, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509308014391>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

KURT, A. Modelling of the cutting tool stresses in machining of Inconel 718 using artificial neural networks. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 6, p. 9645–9657, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417408009329>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

LI, L. et al. High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 129, n. 1–3, p. 127–130, 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602005903?via%3Dihub>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

LIMA, F. F. et al. Wear of ceramic tools when machining Inconel 751 using argon and oxygen as lubri-cooling atmospheres. **Ceramics International**, v. 43, n. 1, p. 677–685, 2017. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.214>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Metais**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2015.408 p.

MAIYAR, L. M. et al. Optimization of Machining Parameters for end Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi based Grey Relational Analysis. **Procedia Engineering**, v. 64, p. 1276–1282, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813017220>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

MARQUES, A. et al. Performance assessment of MSQ: Minimum quantity solid lubricant during turning of Inconel 718. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, p. 0954405415592128-, 2015. Disponível



em: <<http://pib.sagepub.com/content/early/2015/07/16/0954405415592128.full.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed, New York: John Wiley, 2013. 724p.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. 2. ed. New York: John Wiley, 1995.

NEGRETE, C. C. Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. **Journal of Cleaner Production**, v.53, p.195–203, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261300187X>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

OLOVSJÖ, S.; NYBORG, L. Influence of microstructure on wear behaviour of uncoated WC tools in turning of Alloy 718 and Waspaloy. **Wear**, v. 282–283, p. 12–21, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164812000051?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

PAPACHARALAMPOPOULOS, A. et al. Acoustic Emission Signal Through Turning Tools: A Computational Study. **Procedia CIRP**, v. 8, p. 426–431, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827113004058>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

PAWADE, R. S.; JOSHI, S. S. Analysis of acoustic emission signals and surface integrity in the high-speed turning of Inconel 718. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 226, n. 1, p. 3–27, 2012. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405411407656>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

PAWADE, R. S.; JOSHI, S. S.; BRAHMANKAR, P. K. Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 1, p. 15–28, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695507001551?via%3Dihub>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

PECHENIN, V. A. et al. Method of Controlling Cutting Tool Wear Based on Signal Analysis of Acoustic Emission for Milling. **Procedia Engineering**, v. 176, p. 246–252, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817308032>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

PIMENTA, C. D. et al. Método Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da decarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização. **GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 7, n 2, p. 97-108. 2012. Disponível em: <<http://www.gepros.feb.unesp.br>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

PINHEIRO, Cleverson. **Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento de Pinus elliottii**, 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica,

Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/111059>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**. 1. ed. New York: Prentice Hall, 1989. 333 p.

POLVOROSA, R. et al. Tool wear on nickel alloys with different coolant pressures: Comparison of Alloy 718 and Waspaloy. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 26, p. 44–56, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.01.012>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

PUSAVEC, F. et al. Sustainable machining of high temperature Nickel alloy – Inconel 718: part 1 – predictive performance models. **Journal of Cleaner Production**, v. 81, p. 255–269, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614006283>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

PUŠAVEC, F.; KRAJNIK, P.; KOPAČ, J. Transition to sustainable production e Part I: application on machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, 174-184, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652609002613>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

PUŠAVEC, F. et al. Transition to sustainable production—part II: evaluation of sustainable machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, v.18, p. 1211–1221, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652610000260>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

RAHMAN, M.; SEAH, W. K. H.; TEO, T. T. The machinability of inconel 718. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 63, n. 1–3, p. 199–204, 1997. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013696026246?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

RECHT, R. F. Catastrophic thermoplastic shear. **Transactions of ASME. Journal of Applied Mechanics**, p.189-193, 1964. Disponível em: <<http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1396304>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

REED, R. C.; TAO, T.; WARNKEN, N. Alloys-By-Design: Application to nickel-based single crystal superalloys. **Acta Materialia**, v.57, p. 5898-5913, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645409005187>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SANDVIK. **Technical Guide: Turning, Milling, Drilling, Boring, Tool Holding**, 2011.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Editora Artliber, 2007. 246 p.

SARIKAYA, M.; GÜLLÜ, A. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQF. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 604–616, 2014.

SELVARAJ, P.; CHANDRAMOHAN, P.; MOHANRAJ, M. Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method. **Measurement**, v. 49, p. 205–215, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224113005903>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SLAMA, C.; ABDELLAOUI, M. Structural characterization of the aged Inconel 718. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 306, n. 1-2, p. 277-284, 2000. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838800007891>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SHAHROM, M. S.; YAHYA, N. M.; YUSOFF, A. R. Taguchi Method Approach on Effect of Lubrication Condition on Surface Roughness in Milling Operation. **Procedia Engineering**, v.53, p.594–599, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813001951>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SHARMAN, A. R. C.; HUGHES, J. I.; RIDGWAY, K. An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718<sup>TM</sup> when turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 173, n.3, p.359–367, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606000239?via%3Dihub>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to- machine materials with regard to cutting fluids **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 57, p. 83-101, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695512000260>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SILVA, L. R.; COELHO, R. T.; CATAI, R. E. Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga "waspaloy". **Revista Escola de Minas**, v. 57, n. 2, p. 109–114, 2004. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672004000200007&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672004000200007&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 18 mai. 2018.

SILVA, L. R. et al. Estudo da geometria de corte para torneamento de Inconel. **Máquinas e Metais**, v. 37, p. 32 – 55, 2001.

SILVA, L. R. et al. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant—MQL in grinding International. **Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, p. 412-418, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/8910>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SILVA, L. R. et al. Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **Journal of Cleaner Production**, 2013. Disponível em: <<https://pubag.nal.usda.gov/catalog/5468045>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SOUZA, A. J. **Aplicação de Multi-sensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento**. 2004. 211 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/88055/208616.pdf?...1>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

STÅHL, J. E.; SECO TOOLS, A. **Metal Cutting Theories and Models**. Sweden: Lund University Press, 2012.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 4 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 249 p.

THAKUR, D.G; RAMAMOORTHY, B; VIJAYARAGHAVAN, L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning. **Materials and Design**, v.30, p.1718–1725, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306908003506>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

THOMAS, A. et al. High temperature deformation of Inconel 718. **Journal of Material Processing Technology**, v.177, p.469-472, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606004985>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Boston: Butterworth- Heinemann, 2000. 446 p.

ULUTAN, D.; OZEL, T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 3, p. 250–280, 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695510001926>>. Acesso em: 30 mai. 2014.

UMBRELLO, D. Investigation of surface integrity in dry machining of Inconel 718. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, n. 9–12, p. 2183–2190, 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-013-5198-0>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

VIJAY, S.; KRISHNARAJ, V. Machining Parameters Optimization in End Milling of Ti-6Al-4V. **Procedia Engineering**, v.64, p.1079–1088, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813017001>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

WANG, B.; LIU, Z. Acoustic emission signal analysis during chip formation process in high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy and Inconel 718 superalloy. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 27, p. 114–125, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612517300750?via%3Dihub>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

XAVIOR, M. A.; ADITHAN, M. Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. **Journal of materials processing technology**, v. 209, p. 900-909, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013608002094>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

XAVIOR, M. A. et al. Tool Wear Assessment during Machining of Inconel 718. **Procedia Engineering**, v. 174, p. 1000–1008, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.252>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

XUE, C.; CHEN, W. Adhering layer formation and its effect on the wear of coated carbide tools during turning of a nickel-based alloy. **Wear**, v. 270, n. 11–12, p. 895–902, 2011.

Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164811000706?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

YAZID, M. Z. A. et al. Surface integrity of Inconel 718 when finish turning with PVD coated carbide tool under MQL. **Procedia Engineering**, v. 19, p. 396-401, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811029407>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

YILDIZ, Y.; NALBANT, M. A review of cryogenic cooling in machining processes. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 48, p. 947 - 964, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695508000242>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

YÜNLÜ, L.; ÇOLAK, O.; KURBANOĞLU, C. Taguchi DOE Analysis of Surface Integrity for High Pressure Jet Assisted Machining of Inconel 718. **Procedia CIRP**, v. 13, p. 333–338, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827114000572>>. Acesso em: 16 jun. 2014.

ZEILMANN, R. P.; FONTANIVE, F.; SOARES, R. M. Wear mechanisms during dry and wet turning of Inconel 718 with ceramic tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 5–8, p. 2705–2714, 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0329-7>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

ZETEK, M.; ČESÁKOVÁ, I.; ŠVARC, V. Increasing Cutting Tool Life when Machining Inconel 718. **Procedia Engineering**, v. 69, p. 1115–1124, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814003452>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

ZHUANG, K. et al. Employing preheating- and cooling-assisted technologies in machining of Inconel 718 with ceramic cutting tools: towards reducing tool wear and improving surface integrity. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 80, n. 9–12, p. 1815–1822, 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-7153-8>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

ZHUANG, K. et al. Notch wear prediction model in turning of Inconel 718 with ceramic tools considering the influence of work hardened layer. **Wear**, v. 313, n. 1–2, p. 63–74, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.02.007>>. Acesso em: 13 fev. 2018.