



# ANÁLISE EXPERIMENTAL DA FORÇA DE AVANÇO NO PROCESSO DE FURAÇÃO DE LIGA INCONEL 718

Rodrigo Marques Rios, Vladimir Calixto, José Paulo Vogel, Anna Carla  
Araujo

## ► To cite this version:

Rodrigo Marques Rios, Vladimir Calixto, José Paulo Vogel, Anna Carla Araujo. ANÁLISE EXPERIMENTAL DA FORÇA DE AVANÇO NO PROCESSO DE FURAÇÃO DE LIGA INCONEL 718. 8<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2015, Salvador, Brazil. hal-03226777

**HAL Id: hal-03226777**

**<https://hal.science/hal-03226777>**

Submitted on 18 May 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## ANÁLISE EXPERIMENTAL DA FORÇA DE AVANÇO NO PROCESSO DE FURAÇÃO DE LIGA INCONEL 718

Rodrigo Marques Rios, rodrigomrios@gmail.com<sup>1</sup>

Vladimir Calisto, calisto@poli.ufrj.br<sup>2</sup>

José Paulo Vogel, vogel@cefet-rj.br<sup>3</sup>

Anna Carla Araujo, anna@mecanica.ufrj.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento em Engenharia Mecânica, Poli/UFRJ.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ.

Cidade Universitária - Ilha do Fundão, Centro de Tecnologia - , Bloco G - Sala G-202, Rio de Janeiro, RJ, Brasil- CEP 21945-970.

<sup>3</sup> CEFET-RJ – Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LEPU).

**Resumo:** O Inconel 718 é uma superliga a base de níquel amplamente empregada nas indústrias nuclear, petrolífera e principalmente aeroespacial. As suas propriedades de alta dureza, resistência a temperaturas elevadas e baixa condutividade térmica lhe conferem a característica de baixa usinabilidade, onde se observa desgastes severos na ferramenta durante o corte do material. O estudo do comportamento dos esforços de usinagem se faz necessário na busca das condições de corte onde se tem o melhor aproveitamento da ferramenta e assim maior produtividade. Neste trabalho é realizado um estudo experimental das forças de avanço no processo de furação no Inconel 718 em duas situações: com e sem pré-furo de centro. Os experimentos são realizados sequencialmente com três diferentes velocidades de corte mantendo o avanço. Foi verificada a progressão do desgaste de cratera na superfície de saída das brocas nos intervalos dos experimentos. Com este trabalho, conclui-se que a realização do furo de centro confere forças de avanço ligeiramente maiores, mas com comportamento suave esperado teoricamente, e com desgaste mais lento da ferramenta, se comparado com a situação sem furo de centro.

**Palavras-chave:** Furação, Forças de Avanço, Inconel 718, Desgaste de Ferramentas.

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de furação é considerado um dos mais importantes dentre os processos de usinagem. Na indústria manufatureira a grande maioria das peças possuem pelo menos um furo, e somente uma parte muito pequena dessas peças já chegam com o furo pronto oriundo do processo de obtenção da peça bruta, como a fundição por exemplo (DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C. e COPPINI, N. L., 2006). Por ser normalmente realizada nos últimos estágios do processo produtivo, a peça chega nesta etapa com um alto valor agregado, e com isso, erros na execução do furo encarecem a produção devido a geração de refugos (CASTILLO, W.J.G., 2005). Desta forma, é fundamental que se tenha pleno conhecimento do material a ser usinado bem como dos parâmetros de corte que serão utilizados durante o processo de furação, pois isto irá minimizar as chances de falha e permitirá redução de custos e aumento da produção.

Dependendo da microestrutura do material, o processo de usinagem pode ser bem complexo, como é o caso das superligas de níquel. Este material é utilizado principalmente em aplicações aeroespaciais e plantas de geração de energia, onde se requer componentes com elevada resistência mecânica, boa resistência à fadiga, à fluência e à corrosão, mesmo operando continuamente em elevadas temperaturas. A aplicação também se estende a indústria petrolífera, na exploração de petróleo e gás em poços de águas profundas, que normalmente estão submetidos a uma combinação de altas pressões e altas temperaturas com a presença de elementos corrosivos. Neste caso, a utilização de superligas garante que as altas taxas de oxidação do meio não interfiram no funcionamento de válvulas, dutos, flanges e bocais. A baixa taxa de usinabilidade dessas ligas confere a elas o rótulo de um material difícil de usinar (EZUGWU, E. O., 1999; CHOUDHURY, I.A. et al., 1998 e CHEN, Y. C. e LIAO, Y. S., 2003) em função de propriedades como alta resistência e alta dureza a quente, afinidade para reagir com o material da ferramenta e por sua baixa condutividade térmica, o que leva a altas temperaturas na zona de corte. A microsoldagem também pode ocorrer na interface ferramenta-peça levando a formação da aresta postiça de corte.

A liga de níquel Inconel 718 está entre as mais utilizadas e possui uma microestrutura composta por uma matriz austenítica cúbica de face centrada endurecida por precipitação, o que lhe confere alta resistência mecânica em baixa, média e alta temperatura. CHEN, Y. C. e LIAO, Y. S., em 2003, e SHARMAN, A.R.C.; AMARASINGHE A.; RIDGWA K., em 2008 realizaram estudos a compreensão da vida da ferramenta a partir da evolução do desgaste durante operações de furação do Inconel 718. Diferentes geometrias de brocas resultaram em níveis de desgaste e tempos de vida distintos e a evolução do desgaste promoveu o aumento gradual dos esforços de corte. Além da ferramenta, mudanças em outros parâmetros de entrada como: avanço, velocidade de corte e aplicação de fluido de corte, promovem mudanças nos esforços resultantes do processo de furação. Quando comparada as operações de torneamento e fresamento, a furação possui uma literatura bem limitada para este tipo de material apesar de sua

importância no processo de fabricação. É preciso entender as condições de corte ideais para que se tenha o melhor aproveitamento da ferramenta e assim um menor custo de produção.

Os fatores que caracterizam a baixa usinabilidade do Inconel 718 causam desgaste severo na ferramenta durante o corte, tanto desgaste de flanco, desgaste de cratera e falha catastrófica. Isto obriga um grande número de paradas para troca de ferramenta e acerto da máquina o que significa diminuição da produtividade. Para se assegurar a vida da ferramenta e a integridade da superfície usinada é necessária a escolha correta da ferramenta de corte, com material adequado e geometria indicada, além da correta definição dos parâmetros de corte, ou seja, avanço ( $f$ ) e velocidade de corte ( $V_c$ ). A Tabela 1 apresenta as condições de corte encontradas em artigos científicos e referências técnicas na literatura.

O presente trabalho é uma contribuição na compreensão da variação da força de avanço no processo de furação de uma barra de Inconel 718, quando se utiliza diferentes velocidades de corte. As diferentes condições de velocidade de corte são analisadas e a progressão do desgaste na superfície de saída das brocas será avaliada entre os intervalos dos experimentos para verificar sua influência no comportamento da força.

Tabela 1 – Condições de Corte para Usinagem do Inconel 718 encontrados na Literatura

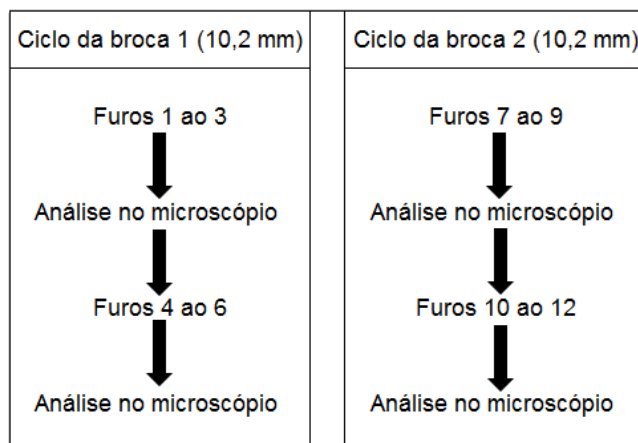
| Referência                                    | Operação    | Material ferramenta | $V_c$ [m/min] | $f$ [mm/rot] |
|-----------------------------------------------|-------------|---------------------|---------------|--------------|
| A. Devillez, et al. 2007                      | Torneamento | MDR                 | 20 - 200      | 0,1 - 0,2    |
| A. Devillez, et al. 2011                      | Torneamento | MDR                 | 40 - 80       | 0,1          |
| A. Kortabarria, et al., 2011                  | Torneamento | MD                  | 30 - 70       | 0,15 - 0,25  |
| J.L. Cantero, et al [10], 2013                | Torneamento | MDR                 | 50 - 70       | 0,1          |
| Nalbant, Altın e Gökkaya, 2007                | Torneamento | MDR                 | 15 - 75       | 0,2          |
| M.Z.A.Yazid, et al., 2011                     | Torneamento | MDR                 | 90 - 150      | 0,10 - 0,15  |
| N. Fang e Q. Wu, 2009                         | Torneamento | MDR                 | 58 - 174      | 0,075 - 0,12 |
| Lohithaksha, et al., 2013                     | Fresamento  | MD                  | 25 - 75       | 0,06 - 0,12  |
| S. Zhang, J.F. Li, Y.W. e Wang, 2012          | Fresamento  | MDR                 | 55            | 0,1          |
| Chen, Y. C.; Liao, Y. S., 2003                | Furação     | MDR                 | 13,2          | 0,1          |
| Machining nickel alloys, liga não envelhecida | Furação     | AR                  | 3 - 4         | 0,1 - 0,18   |
| Machining nickel alloys, liga envelhecida     | Furação     | AR                  | 2 - 3         | 0,15 - 0,25  |
| Sharman, Amarasinghe and Ridgwa, 2008         | Furação     | MDR                 | 25            | 0,1          |
| T. Beno e U. Hulling, 2012                    | Furação     | MD                  | 35            | 0,05         |

\*AR – Aço Rápido / MD – Metal Duro / MDR – Metal Duro com recobrimento / AR

## 2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia utilizada nos experimentos que são realizados neste trabalho tem o objetivo de analisar o comportamento no tempo das forças de avanço durante o processo de furação do Inconel 718 com diferentes velocidades de rotação. São realizados dois grupos de experimentos: em uma superfície onde foi realizada uma furação de centro e um em cheio, sem furo de centro. Todos os testes produziram furos de 5 mm de profundidade, comprimento suficiente para alcançar o patamar constante teórico da área de corte.

Adicionalmente o desgaste é verificado a cada três testes, pois é utilizada uma ferramenta para cada grupo sem troca da ferramenta, como ilustrado na Fig.1.



**Figura 1:** Ciclo das brocas helicoidais 1 e 2

## 2.1. Montagem experimental para medida da força de avanço

Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem marca Romi tipo V400 com a fixação da peça em dinamômetro Kistler 9257-BA conectado a um amplificador de sinais e uma placa de aquisição de dados. O corpo de prova utilizado nos ensaios foi uma peça cilíndrica de Inconel 718 soldada a uma chapa para correta fixação no dinamômetro conforme mostrado na Fig.2.

Foi utilizada uma broca de 10,2 mm de diâmetro e de aço rápido com 5% de cobalto (Titex) com tratamento térmico para aumento de dureza, HSS-E. A fixação da broca na máquina foi feita através de um mandril com pinça. A broca helicoidal tem modelo A1244 com ângulo de ponta igual ( $\sigma$ ) a  $130^\circ$  e afiação cônica, apropriado para furação do Inconel 718 por recomendação do fabricante.

Dois conjuntos de furos foram realizados: com furo de centro e sem furo de centro. A broca utilizada para etapa de pré-furação foi uma broca de centro de aço rápido, A200 Dormer. Os parâmetros de corte utilizados foram velocidade de corte igual a 4 m/min e avanço igual 0,019 mm/rot, conforme recomendações do fabricante para furação do Inconel 718.

O fluido de corte utilizado foi Balxedot do fabricante Baltar Química, um fluido solúvel de base vegetal com etanol e óleo de soja em sua composição.



**Figura 2:** Corpo de prova fixado ao dinamômetro

## 2.2. Parâmetros de corte

Inicialmente os parâmetros de corte de furação foram definidos a partir das recomendações do fabricante e análise dos artigos destacados na Tab.1. A velocidade de rotação utilizada foi de 62 rpm e o avanço por rotação 0,07 mm/rot. Assim tem-se:  $V_c = 2$  m/min e  $V_f = 4$  mm/min.

Para o planejamento de experimentos, utilizou-se três níveis de velocidade de corte: 2, 4 e 6 m/min. Cada nível foi realizado duas vezes com a mesma ferramenta. O avanço por rotação foi mantido constante.

A sequência de ensaios a serem executados para investigação da força de avanço foi planejada de forma aleatória com duas réplicas para cada experimento de modo a minimizar a influência do desgaste da ferramenta nos resultados e aumentar a confiabilidade dos gerados. Após a análise dos resultados, verificou-se que não podemos considera-los

como réplicas em função do desgaste acelerado, se comparado com a usinagem de outros materiais. Desta forma, cada teste é considerado um experimento na sequência de furação.

Foram então realizados doze experimentos no total com três velocidades de corte distintas, com e sem pré-furação e duas réplicas para cada condição. Os furos 1 ao 6 foram executados sem pré-furação e os furos 7 ao 12 foram executados com furação prévia. Os parâmetros de corte adotados para a realização dos experimentos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1: Dados de corte dos furos para os ensaios

| Experimento | Vc<br>(m/min) | N (rpm) | Vf<br>(mm/min) | Furo de Centro     |
|-------------|---------------|---------|----------------|--------------------|
| 1           | 4             | 125     | 9              | Sem furo de centro |
| 2           | 2             | 62      | 4              |                    |
| 3*          | 6             | 187     | 13             |                    |
| 4           | 6             | 187     | 13             |                    |
| 5           | 4             | 125     | 9              |                    |
| 6*          | 2             | 62      | 4              |                    |
| 7           | 4             | 125     | 9              | Com furo de centro |
| 8           | 2             | 62      | 4              |                    |
| 9*          | 6             | 187     | 13             |                    |
| 10          | 6             | 187     | 13             |                    |
| 11          | 4             | 125     | 9              |                    |
| 12*         | 2             | 62      | 4              |                    |

\* - após estes testes a ferramenta foi retirada para verificar desgaste

### 2.3. Análise do Desgaste da Ferramenta

A avaliação do desgaste nas superfícies de saída da ferramenta foi realizada em intervalos de três experimentos, ou seja, após a execução de três furos com as três velocidades de corte distintas o processo era paralisado e broca levada para análise em um microscópio. Para as análises foram utilizados o microscópio óptico Pantec equipado com câmera digital, disponível no laboratório e o microscópio óptico Olympus modelo BX60M também equipado com câmera, disponível no Laboratório de Processamento Termomecânico – BioMateriais no Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFRJ.

## 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 3.1. Comprimentos característicos e estimativa do comportamento da força de avanço

A curva teórica da variação da força de avanço com o tempo para a usinagem do corpo de prova tem a característica de apresentar três estágios: a entrada da aresta transversal; a entrada da ponta da broca, quando a área de corte aumenta a medida que o comprimento da aresta ativa de corte aumenta; e um estágio quando a força de usinagem é constante, uma vez que a área de corte se mantém.

Quando a furação é realizada após a usinagem de uma broca de centro com diâmetro maior que o núcleo da aresta transversal, a primeira fase é substituída pelo tempo que a broca usina o comprimento pré-usinado pela broca de centro. A partir da geometria da broca e da broca de centro, podemos identificar o comprimento usinado referente a cada etapa. No caso deste trabalho a profundidade da furação para completar a entrada da ponta da broca é 2,4 mm e a profundidade do furo de centro é de 1,6 mm.

Teoricamente, espera-se que após a entrada da ponta da broca, ou seja, a partir de 2,4 mm de comprimento usinado, a força de avanço se mantenha constante em um patamar que pode ser calculado a partir de um modelo analítico ou por um modelo semi-empírico, como o modelo de Kienzle.

O valor do patamar da força de corte  $F_c$  é calculado em função da área do cavaco por em função da pressão específica  $k_c$ , do avanço por rotação  $f$  e do diâmetro da broca, como apresenta a Eq. 1.

$$F_t = F_c = k_c \cdot A = k_c \cdot \frac{f \cdot D}{2} \quad (1)$$

A força de corte, segundo o modelo semi-empírico de Kienzle (Klocke, 2011) é escrita em função das constantes  $k_{c1.1}$  e  $mc$  por:

$$F_t = k_{c1.1} \cdot f^{(1-mc)} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{(\sin(\frac{\phi}{2}))^{mc}} \quad (2)$$

A força de avanço pode ser calculada em função da força de corte. Alguns modelos empíricos consideram que a razão entre a força de corte a força de avanço na furação é aproximadamente constante. Como referencial teórico, não será considerado um valor específico para esta relação e é identificado como  $r_z$ .

$$F_z = r_z \cdot F_c \quad (3)$$

Nota-se que, como os avanços de todos os experimentos são os mesmos, a única diferença entre as curvas que se espera é uma diferença entre os patamares da pressão específica com a velocidade de corte, ou com o desgaste. Espera-se que as curvas no tempo apresentem um comportamento linear crescente até alcançar o patamar de  $F_z$ , que deve se manter constante até o final da furação, uma vez que a área do cavaco se mantém constante. A constante de proporcionalidade deve apresentar uma mudança após a entrada da aresta transversal, que ocorre em 0,5mm.

### 3.2. Força de avanço experimental

As Figuras 3a, 3b e 3c apresentam as curvas experimentais da força de avanço medida nos experimentos de 1 a 6, realizado em furos sem a furação de centro. Observa-se que no quinto experimento executado ( $V_c=4\text{mm} - R2$ ) o comportamento da curva é o previsto, com duas rampas lineares, e o patamar com valor experimental médio representado por “ $F_z$  média\_R2” identificado na Fig. 3b. As outras curvas apresentam comportamento diferente, com uma região de vale na região do final da entrada da ponta da broca. Uma comparação entre as curvas está na Fig. 3d.

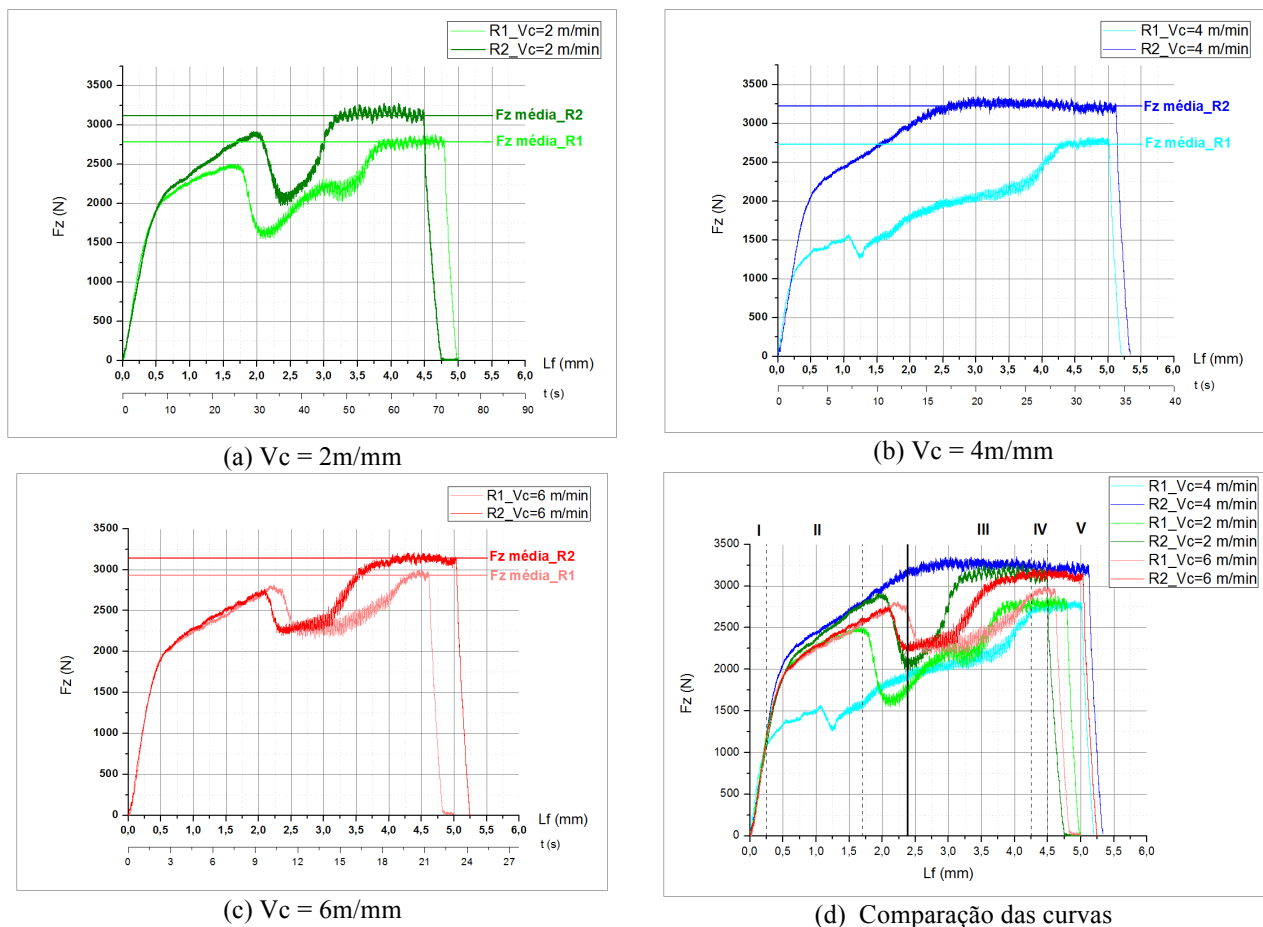


Figura 3: Comportamento de avanço no processo de furação em cheio

Na Fig. 4 pode-se observar que as curvas das forças de avanço dos experimentos de 7 a 12, realizados após a usinagem do furo de centro apresentam o comportamento teórico esperado, em todos os casos.

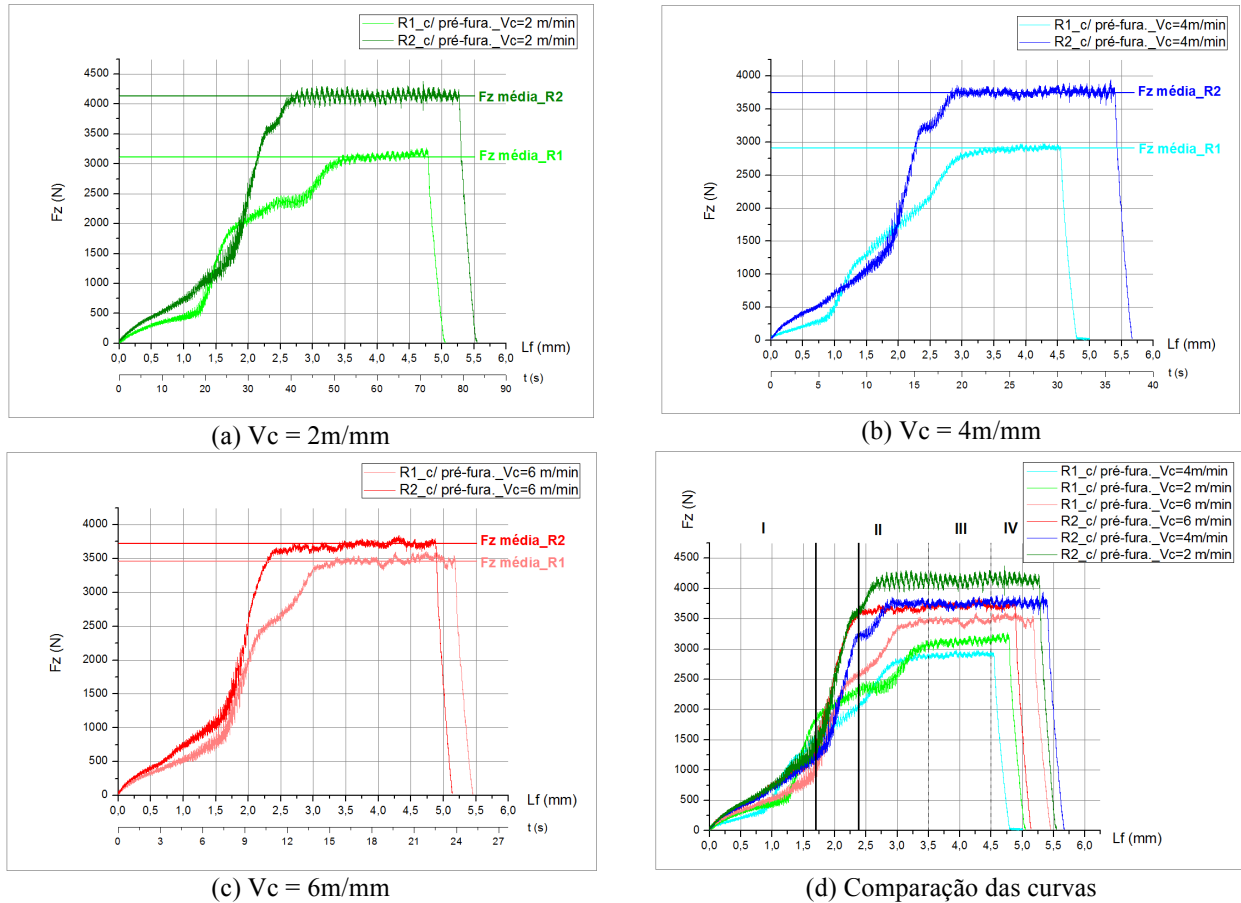


Figura 4: Comportamento de avanço no processo de furação após furo de centro

A partir dos valores experimentais de todos os patamares, utilizando no cálculo o mesmo número de rotações da ferramenta, calculou-se a média e o desvio de cada experimento. A Fig. 5a apresenta os valores calculados a partir dos dados experimentais referente ao patamar da força de avanço nos 6 experimentos sem furo de centro e a Fig. 5b realizados após a pré-furação. Percebe-se que, apesar do comportamento mais suave, os níveis alcançados nos casos com furo de centro são maiores. O incremento de força das réplicas R2 dos ensaios com relação a R1 foi de: 11,8, 18,1 e 7,3 % para furação em cheio e 32,6, 28,9 e 7,6% para as velocidades de corte de 2, 4 e 6 m/min respectivamente. O incremento de força se deu em função do desgaste da ferramenta.

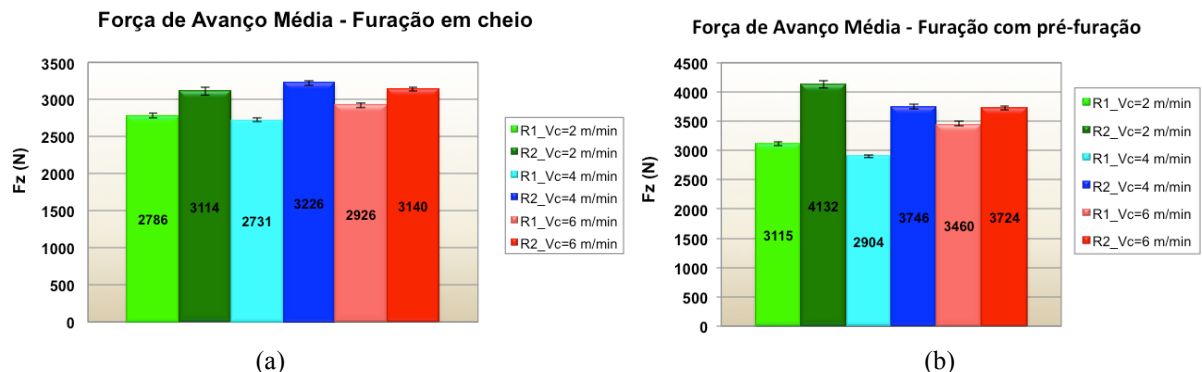


Figura 5: Comparação dos níveis máximos da força de avanço (patamares)

### 3.3. Desgaste da Ferramenta

A progressão do desgaste de cratera e a deformação da ponta da broca foram inspecionadas durante os intervalos dos experimentos. A Fig. 6a e 6b mostram a condição da broca 1 após a realização dos três primeiros furos com as três velocidades de corte distintas e a Fig. 6c e 6d evidencia a condição da mesma ferramenta após a repetição dos ensaios.

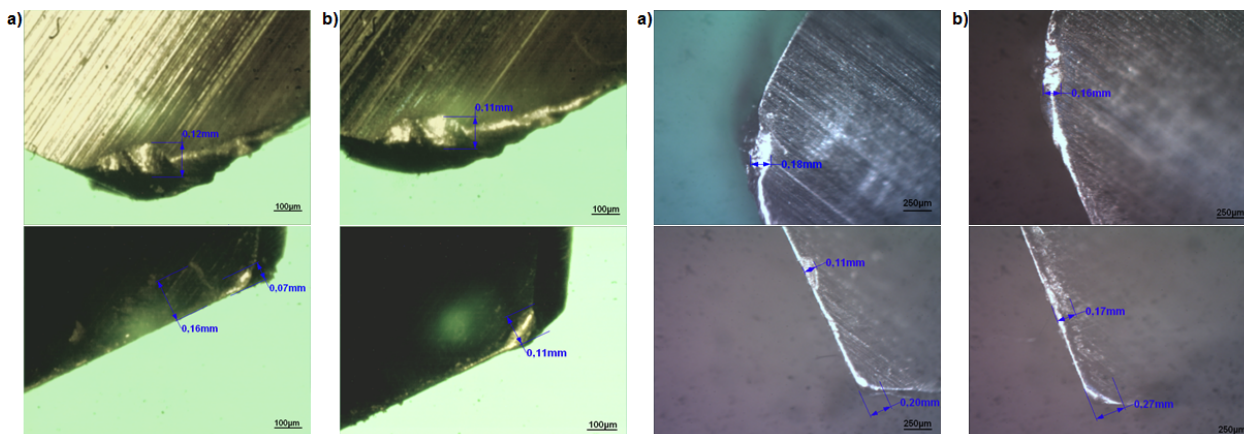


Figura 6 - Deformação da ponta e desgaste de cratera na broca 1 em a) aresta 1; b) aresta 2 e ao final dos 6 ensaios c) aresta 1 d) aresta 2 nos experimentos sem furo de centro

Nota-se uma clara evolução do desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta entre os primeiros ensaios e suas réplicas. Nesta segunda fase, constatou-se que o desgaste de cratera nas extremidades das arestas foi mais significativo, atingindo a marca de 0,27 mm, quase três vezes maior que a condição no início do processo. Esta é uma região crítica em função das altas temperaturas geradas com a máxima velocidade de corte que vem a causar a diminuição da dureza da ferramenta. Possivelmente este desgaste é de abrasão das partículas muito duras do Inconel 718, pela superfície de saída da broca, causando um efeito abrasivo nesta região (RODRIGUES, M. A., HASSUI A., 2007). Como a ferramenta de aço-rápido utilizada não contava com um revestimento para atenuar este efeito, a progressão do desgaste se deu de forma rápida.

A Fig. 7a e 7b apresentam a condição da broca após os três primeiros ensaios realizados com broca 2 na execução dos furos com pré-furação de 1,7 mm de profundidade e 1,6 mm de diâmetro. A Fig. 7c e 7d apresentam as imagens de desgaste da mesma ferramenta após o final dos ensaios.

Pode-se observar que, como esperado, houve uma evolução do desgaste de cratera principalmente na periferia da broca com desgaste atingindo a marca de 0,22 mm. Porém, a região da aresta transversal não manteve a progressão de desgaste como observado para furação em cheio, houve uma estagnação do desgaste nesta região indicando um aumento de vida da ferramenta.

Observa-se uma redução em torno de 20% nos valores de desgaste de cratera obtidos nas as réplicas dos ensaios de furação com pré-furação em relação aos obtidos nos experimentos de furação em cheio, indicando um melhor aproveitamento da ferramenta com execução do furo de centro onde se tem a estabilização do comportamento da força de avanço.

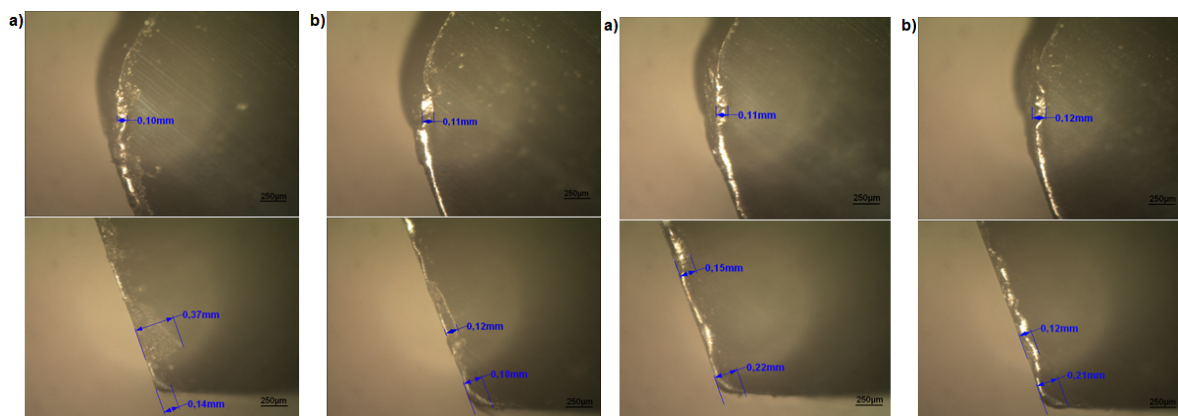


Figura 6 - Deformação da ponta e desgaste de cratera na broca 2 em a) aresta 1; b) aresta 2 e ao final dos 6 ensaios c) aresta 1 d) aresta 2 nos experimentos com furo de centro

#### 4. CONCLUSÕES

Este estudo forneceu uma contribuição para compreensão dos efeitos da variação da velocidade de corte na força de avanço durante operações de furação do Inconel 718 utilizando três condições de corte distintas. As variações de força de avanço não foram sensíveis às mudanças de velocidades de corte, indicando que o crescimento da força foi muito mais influenciado pela progressão do desgaste da broca do que propriamente pela velocidade de corte testada.

A menor variação de força entre os testes R1 e R2 foi observada para velocidade de corte de 6 m/min, tanto para furação em cheio quanto para furação com pré-furação. Isto porque o segundo ensaio foi realizado logo após o primeiro, minimizando a influência do fator desgaste e reforçando a influência do desgaste da ferramenta nos resultados.

Os experimentos realizados sem pré-furação apresentaram uma variação na curva da força de avanço diferente da esperada teoricamente, enquanto as curvas adquiridas experimentalmente nos processos de furação realizados após o furo de centro apresentam a variação suave esperado. Por outro lado, o patamar das curvas obtidas nos experimentos com furo de centro apresentaram níveis mais elevados.

O desgaste de cratera foi observado nas duas brocas utilizadas nos ensaios. A execução do furo de centro promoveu uma redução em torno de 20% neste desgaste. Nos dois casos, ocorreu uma evolução do desgaste através do mecanismo de abrasão entre os primeiros ensaios e o final dos testes, gerando forças até 32,6% maiores na repetição de testes com mesma velocidade de corte. Como era de se esperar, a região mais crítica foi a de velocidade de corte máxima ou seja, na periferia da broca, apresentando desgaste de até 0,27 mm na broca 1.

Para projetos futuros a determinação do tempo de vida da ferramenta e a execução de testes com ferramentas de metal duro e cerâmicas seguirão buscando soluções que combinem menor custo e maior produtividade na furação do Inconel 718. Além disso, a execução de ensaios que combinassem outras faixas de avanço e velocidades de corte seriam importantes para determinação de uma função para o cálculo da pressão específica de avanço em função destes parâmetros.

#### REFERÊNCIAS

- BENO T., HULLING U., "Measurement of Cutting Edge Temperature in Drilling", *Procedia CIRP*, v. 3, pp. 531 – 536, 2012.
- CANTERO J.L., DÍAZ-ÁLVAREZ J., MIGUÉLEZ M.H., "Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718", *Wear*, v. 297, pp. 885–894, 2013
- CASTILLO, W.J.G., *Furação Profunda do Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-duro com Canais Retos*. Tese de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2005.
- CHEN, Y. C., LIAO, Y. S., "Study on Wear Mechanisms in Drilling of Inconel 718 Superalloy", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 140, pp. 269–273, 2003.
- CHOUDHURY, I.A. *et al.*, "Machinability of nickel-base alloys: a general review", *Journal of Materials Processing Technology*, n. 77, p. 278–284, 1998.
- DEVILLEZ A., LE COZ G., DOMINIAK S., *et al.*, "Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 211, pp. 1590–1598, 2011.
- DEVILLEZ A., SCHNEIDER F., DOMINIAK S., *et al.*, "Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools", *Wear*, v. 262, pp. 931–942, 2007.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, 5ª ed, São Paulo, Artliber, 2006.
- EZUGWU, E. O. *et al.*, "The machinability of nickel based alloys: a review", *Journal of Materials Processing Technology*, n. 86, p. 1–16, 1999.
- 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, pp. 4385–4389, 2009.
- KLOCKE, F., *Manufacturing Process 1 – Cutting*, RWTH edition, Berlin, Springer, 2011.
- KORTABARRIA A., MADARIAGA A., FERNANDEZ E., "A comparative study of residual stress profiles on Inconel 718 induced by dry face turning", *Procedia Engineering*, v. 19, 228 – 234, 2011.
- LOHITHAKSHA M. M., RAMANUJAM R., VENKATESAN K., *et al.*, "Optimization of Machining Parameters for End Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi Based Grey Relational Analysis", *Procedia Engineering*, v. 64, pp.1276 – 1282, 2013.
- Machining nickel alloys, A Nickel Development Institute Reference Book, Series N° 11008. Disponível em: <[http://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/MachiningNickelAlloys\\_11008\\_.pdf](http://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/MachiningNickelAlloys_11008_.pdf)> Acesso em: 14 abril 2014.
- NALBANT M., ALTIN A., GÖKKAYA H., "The effect of coating material and geometry of cutting tool and cutting speed on machinability properties of Inconel 718 super alloys", *Materials and Design*, v. 28, pp. 1719–1724, 2007.
- RODRIGUES, M. A., HASSUI A., "Análise dos desgastes de ferramentas de metal duro revestidas no fresamento da liga a base de níquel - Inconel 625 – depositada em forma de revestimento metálico", 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, São Paulo, SP, Brasil, 15 a 18 de abril de 2007.
- SHARMAN, A.R.C.; AMARASINGHE A.; RIDGWA K., "Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 200, pp. 424–432, 2008.
- VALENTIM, P., *Furação do Inconel 718*, Testes no Laboratório CEFCON, UFRJ, RJ, Brasil, 2013.
- YAZID M.Z.A., CHEHARON C.H., GHANI J.A., *et al.*, "Surface integrity of Inconel 718 when finish turning with PVD coated carbide tool under MQL", *Procedia Engineering*, v. 19, 396 – 401, 2011.
- ZHANG S., LI J.F., WANG Y.W., "Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions", *International Journal of Cleaner Production*, v. 32, pp. 81–87, 2012.

[21] DOS SANTOS, J. C., *Estudo do uso de ferramentas cerâmicas na usinagem de Inconel 718*, Tese de M.Sc., Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, Brasil, 2010.

## DIREITOS AUTORAIS

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

## EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE THRUST FORCE ON INCONEL 718 DRILLING PROCESS

**Abstract:** *The super alloy Inconel 718 is a nickel based metal widely used in nuclear, oil and aerospace industry. Its high hardness in hot temperatures and low thermo conductivity contribute to the low machinability of this alloy with high tool wear. The study of the cutting forces is necessary to predict a economic set of parameters and a higher productivity This work is an experimental study of thrust forces in drilling Inconel in two situations: with and without previous center drilling. The experiments are produced sequentially with three different cutting velocities, and constant feed per revolution. The experiments are carried out sequentially using three different cutting speeds with constant feed per revolution. An increase of crater wear on the drills is verified. It can be concluded that using the center drilling, slightly higher feed forces on drilling are achieved, although the smooth behavior expected theoretically can be seen. On the experiments without center drilling the tool wear is higher and the force does not presents as it is expected in theory.*

**Keywords:** *Drilling, Thrust forces, Inconel 718, Tool wear.*