

EFEITO DA ESTRATÉGIA DE FRESAMENTO NOS ESFORÇOS DE USINAGEM DO INCONEL 625

Iago Areas Cazotto, iago.cazotto@edu.ufes.br¹
Eduardo Sigler Junior, eduardo.sigler@ufes.br¹
Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Tecnologia Mecânica, 29075-910, Vitória/ES, Brasil

Resumo: A automação da usinagem, através da utilização de máquinas-ferramentas controladas por comando numérico computadorizado (CNC) e de sistemas CAD/CAM, contribui para melhorar a qualidade e eficiência do processo de fabricação, principalmente no que se refere à operação de fresamento, cujas movimentações da ferramenta de corte são mais complexas. Assim, um estudo detalhado para o estabelecimento e consolidação das técnicas relacionadas ao uso de sistemas CAD/CAM voltado para a otimização das estratégias de usinagem se mostram relevantes, uma vez que a trajetória da ferramenta tem influência direta no tempo de usinagem, nos esforços de corte, no desgaste da ferramenta e na qualidade da superfície da peça, afetando consequentemente os custos e a produtividade do processo. Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo estudar o efeito de estratégias de fresamento nos esforços de corte e rebarbas formadas em superligas de níquel, classificadas como materiais de difícil usinabilidade por apresentarem elevada ductilidade atrelada a uma alta taxa de encruamento, além de baixa condutividade térmica. Estas características, geralmente induzem a formação de rebarbas bastante duras com efeito serrilhado e altamente encruadas no fim do contato ferramenta-peça durante a operação de fresamento, fazendo com que os esforços de corte e desgaste da ferramenta sejam aumentados significativamente. Para tanto, foram executados ensaios práticos comparativos em duas diferentes estratégias de fresamento frontal de faceamento, denominadas longitudinal e off-set, em superfícies de aço AISI 1020 recobertas, por soldagem, com liga Inconel 625. Os ensaios foram executados a seco, mantendo-se os parâmetros de corte, programados, constantes para ambas trajetórias ($v_c = 35$ m/min; $f_z = 0,08$ mm/volta.dente; $ap = 0,5$ mm e $ae = 14$ mm). As ferramentas utilizadas consistiram em um corpo de fresa HM390 ETC D20-3-C20-07 para três insertos de metal duro HM390 TCKT 0703 PCTR (classe ISO: S10 - S25). Os resultados mostraram que a trajetória off-set se mostrou mais eficiente que a trajetória longitudinal, uma vez que influenciou positivamente o processo reduzindo os esforços de corte e minimizando as dimensões das rebarbas formadas durante o fresamento a seco do Inconel 625.

Palavras-chave: estratégias de usinagem, fresamento, Inconel 625, esforços de corte, rebarba

1. INTRODUÇÃO

Na indústria de fabricação, a necessidade de se obter uma alta taxa de produtividade associada a redução de gastos com mão de obra e matéria-prima foi um fator que não apenas impulsionou como também viabilizou avanços tecnológicos no setor de automação da manufatura. As máquinas-ferramentas controladas por comando numérico computadorizado (CNC) surgiram para substituir as máquinas ferramentas convencionais em grandes linhas de produção (Machado *et al.*, 2011). Posteriormente, o desenvolvimento dos sistemas CAD/CAM possibilitou a redução do tempo de programação e de erros humanos na geração dos códigos compilados pelas máquinas CNC, principalmente, no que tangencia a fabricação de peças com geometrias complexas (Souza e Ulbrich, 2013).

Para a usinagem de uma peça, a ferramenta pode seguir diferentes formatos geométricos topológicos. Nesse sentido, a estratégia de usinagem destaca-se por representar o percurso da ferramenta durante a operação de corte, a qual tem influência direta no tempo de usinagem, nos esforços de corte, no desgaste da ferramenta e na qualidade superficial que irão compor as características do produto e necessidade de etapas subsequentes, afetando a eficiência do processo, e consequentemente os custos e produtividade (Pereira *et al.*, 2005; Scandiffio *et al.*, 2017). Identificar a melhor estratégia não é simples e deve ser realizada pelo usuário. Os sistemas CAM atuais não estão aptos a identificar as melhores estratégias de usinagem para casos específicos, conforme a geometria a ser usinada (Souza e Ulbrich, 2013).

Baseado nisso, é necessário um estudo detalhado das estratégias de usinagem empregadas nos mais variados materiais de engenharia, principalmente os de difícil usinabilidade e que representam maiores valores agregados, como é o caso das superligas de níquel, tal como o Inconel 625. Fazendo desta, uma linha de pesquisa relevante na busca pela melhoria

constante das técnicas de processamento utilizando máquinas-ferramentas CNC por meio dos recursos do CAM, particularmente no que se refere à operação de fresamento, cujas movimentações da ferramenta de corte são complexas, exigindo recursos computacionais para calculá-las.

As superligas de níquel, tal como o Inconel 625, são classificadas como materiais de difícil usinabilidade por apresentarem elevada ductilidade atrelada a uma alta taxa de encruamento, além de baixa condutividade térmica (Machado *et al.*, 2011; Diniz *et al.*, 2014). Estas características, induzem a formação de rebarbas bastante duras com efeito serrilhado de material altamente encruado no fim do contato ferramenta-peça durante a operação de fresamento, fazendo com que os esforços de corte e desgaste sejam aumentados significativamente (Diniz *et al.*, 2014).

A rebarba é um resíduo de cavaco que fica aderido à peça, aumentando etapas de fabricação com operações adicionais de rebarbação. Os mecanismos de formação e as dimensões da rebarba além de dependerem das características do processo de usinagem, localização da operação na peça, estão diretamente relacionadas com as propriedades do material da peça, o que afeta sua usinabilidade. Assim, o conhecimento dos fenômenos envolvidos na formação de rebarbas e suas características, contribuem para otimização das operações de usinagem, por meio de diferentes estratégias de usinagem, buscando a minimização de suas dimensões. No fresamento, a profundidade de corte e a penetração de trabalho, além dos métodos concordante e discordante, e a flutuação de temperatura têm influência direta na formação de rebarbas na peça durante o corte (Araújo *et al.*, 2020).

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho consiste em investigar o efeito de diferentes estratégias de fresamento frontal de faceamento em uma liga de Inconel 625 nas respostas de esforços de corte e rebarbas formadas.

2. METODOLOGIA

Para o estudo do efeito da estratégia de usinagem nos esforços de corte e rebarbas formadas na liga de Inconel 625, foram avaliadas duas estratégias de fresamento frontal de faceamento: (1) longitudinal; e (2) *off-set*, como mostrado esquematicamente na Fig. 1. Para tanto, as estratégias foram criadas utilizando um sistema CAM, no qual foram inseridas as características da ferramenta de corte e os valores dos parâmetros de corte. Em seguida, através da ferramenta de pós-processamento do CAM, definindo uma fresadora padrão de três eixos, foi gerado o programa NC em código G para implementação e execução pela máquina-ferramenta CNC. Algumas pequenas modificações manuais no código, foram necessárias para tornar o código compatível com o Centro de Usinagem CNC D600 da Romi.

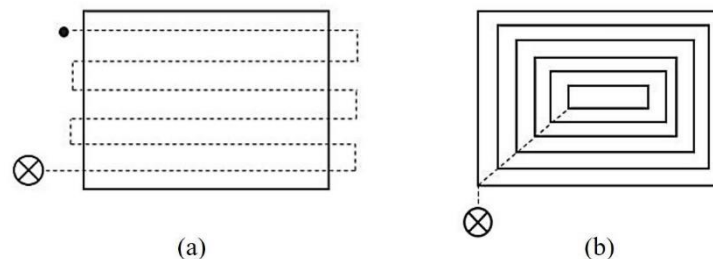


Figura 1. Modelo esquemático das diferentes estratégias para o fresamento de uma superfície plana. (a) trajetória longitudinal e (b) trajetória off-set. Adaptado de Souza e Ulbrich (2013).

Os ensaios de fresamento frontal de faceamento foram executados a seco, mantendo-se os parâmetros de corte, programados, constantes para ambas trajetórias em 35 m/min; 0,08 mm/volta.dente; 0,5 mm e 14 mm, para velocidade de corte (vc), avanço por dente (fz), profundidade de corte (ap), e penetração de trabalho (ae), respectivamente. A penetração de trabalho de 14 mm foi adotada a fim se obter uma entrada da ferramenta mais suave na peça, considerando um fresamento concordante com entrada de corte radial (ae) equivalente a 70% do diâmetro de corte da fresa, de forma que as forças compressivas de impacto na entrada fossem reduzidas (Sandvik do Brasil S.A., 2007).

As ferramentas utilizadas (Fig. 2) consistiram em um corpo de fresa HM390 ETC D20-3-C20-07 para três insertos de metal duro HM390 TCKT 0703 PCTR (classe ISO: S10-S25), ambos da ISCAR. Para cada ensaio foram utilizadas arestas novas para que não houvessem interferência de efeitos de desgaste da ferramenta nos resultados de esforços e rebarbas.

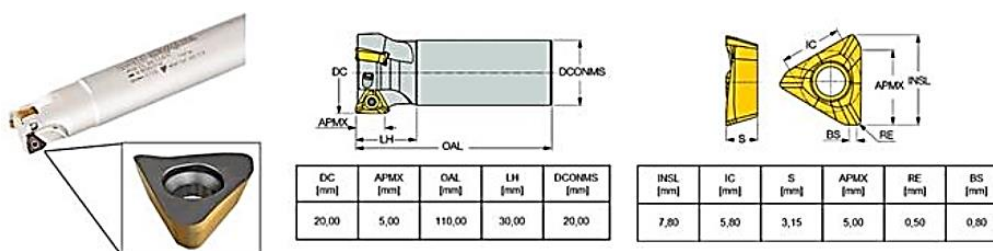


Figura 2. Corpo da fresa e inserto especificado para o fresamento do Inconel 625, para um diâmetro de corte (DC) igual a 20 mm. Adaptado de Iscar LTD (2020).

Corpos de prova padronizados foram fabricados a partir de uma chapa grossa de aço AISI 1020 revestida por uma camada de Inconel 625 de aproximadamente 6 mm de espessura na parte superior, para garantir melhor fixação na plataforma dinamométrica, utilizada para o monitoramento das componentes das forças de usinagem. A Figura 3 apresenta as dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de fresamento do Inconel 625.

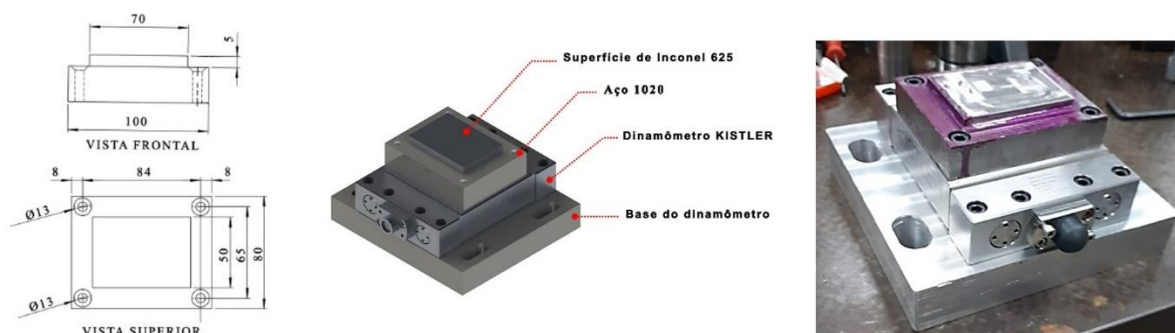


Figura 3. Configuração esquemática dos corpos de prova (CP) para os ensaios de fresamento do Inconel 625. À esquerda as dimensões do CP; no centro o CAD da montagem do conjunto CP-dinamômetro sobre a base para fixação na mesa do centro de usinagem; e à direita o CP fabricado e fixado por parafusos no dinamômetro.

Os esforços de corte, ou componentes ortogonais da força, utilizadas para estimar a força de usinagem, foram monitoradas através de um sistema de medição de força de usinagem da Kistler composto por dinamômetro piezoelétrico modelo 9129 AA, amplificador de sinais modelo 5080A1030001, sistema de aquisição modelo 5697A1 com *software* de análise *DynoWare*, utilizando uma taxa de aquisição de 100 Hz. A Figura 4 mostra a montagem do sistema de medição de força de usinagem utilizado nos ensaios de fresamento.



Figura 4. Sistema de medição de força de usinagem Kistler.

O estudo das características das rebarbas formadas durante a usinagem da superfície de Inconel 625 foi realizado por meio da análise qualitativa visual e por meio do auxílio de estereo microscópio com faixa de medição de 7 a 90x, modelo NexiusZoom com câmera HD-Autofocus e *software* de medição integrado da Euromex.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os códigos de ambas trajetórias foram simulados dentro do software CAM com objetivo de garantir que a operação seria executada na máquina-ferramenta conforme o esperado. A Figura 5 representa a simulação CAM das estratégias executadas na superfície da peça modelada em CAD, onde a linha em azul representa a trajetória do centro da ferramenta percorrida sobre a superfície da peça. Uma vez que, foi adotado um fresamento concordante com penetração de trabalho (ae) equivalente a 70% do diâmetro da fresa, pode-se observar, na Fig. 5, que o início das trajetórias programadas será executado com o centro da ferramenta deslocado de 4 mm da borda da peça, ou seja, considerando um ae igual a 14 mm.

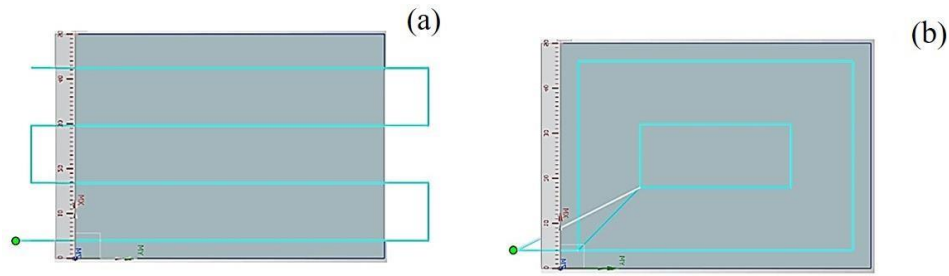


Figura 5. Vista superior das estratégias de fresamento frontal de faceamento simuladas no CAM sendo (a) trajetória longitudinal e (b) trajetória em *off-set*.

A Figura 6 mostra o teste gráfico dos códigos executados no centro de usinagem.



Figura 6. Teste gráfico no Centro de Usinagem CNC D600 para as trajetórias (a) longitudinal e (b) *off-set*.

A Figura 7 mostra os sinais das componentes ortogonais da força de usinagem, F_x , F_y e F_z ; e a Fig. 8 a força de usinagem, resultante das três componentes, em função do tempo. Estes sinais foram registrados durante os ensaios de fresamento frontal de faceamento na superfície de Inconel 625 para ambas as trajetórias programadas, longitudinal e *off-set*.

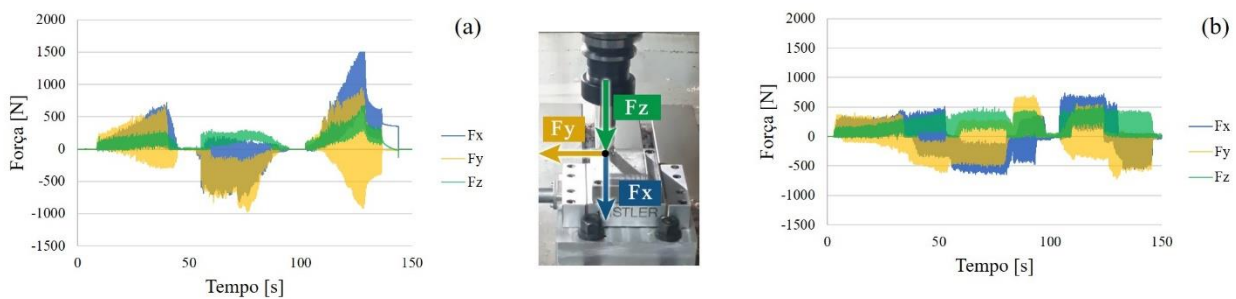


Figura 7. Sinais representativos dos esforços de corte registrados durante de fresamento frontal de faceamento do Inconel 625, destacando as componentes ortogonais da força de usinagem, F_x , F_y e F_z em função do tempo de corte para as estratégias: (a) longitudinal e (b) *off-set*.

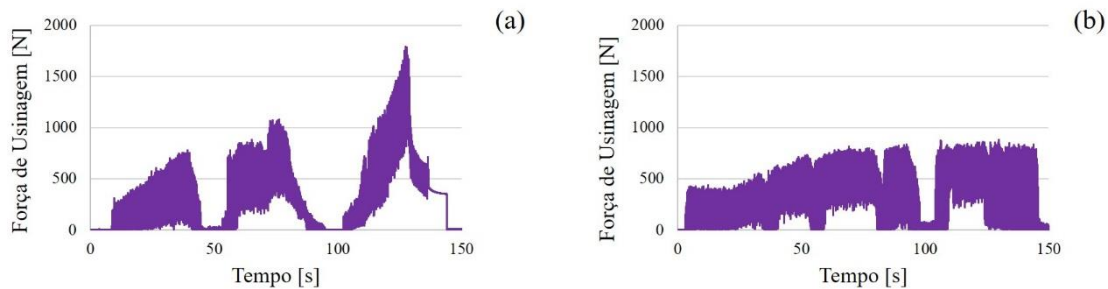


Figura 8. Sinais representativos da força resultante de usinagem, F_U , em função do tempo de corte para as estratégias: (a) longitudinal e (b) *off-set*.

Da avaliação dos sinais de força apresentados na Fig. 7, observa-se sinais positivos e negativos de força, principalmente para as componentes F_x e F_y , em ambas as trajetórias, comum em operações de fresamento devido às

mudanças de direções das arestas de corte em torno do plano de trabalho XY. De modo geral, o sinal de força apresenta uma relação direta com a severidade do corte e com o desgaste da ferramenta.

Os resultados de força mostraram que o fresamento do Inconel 625 utilizando a estratégia de usinagem *off-set* apresentou sinais com patamares constantes ao longo do tempo, com valor médio de força de usinagem resultante em torno de 500 N (Figura 8(b)). Pode ser observado no intervalo entre 95 s e 105 s (Figura 8 (b)), que os esforços de corte sofreram uma queda brusca, momento em que a ferramenta terminou o primeiro contorno, perdendo contato com a peça, e reiniciou o segundo contorno mais interno da trajetória programada, com um novo patamar constante de força. A utilização da trajetória *off-set* permitiu que o fresamento fosse bem sucedido, em que a ferramenta de corte executou toda a trajetória programada para a usinagem da superfície de Inconel 625, com percurso de avanço (Lf) estimado em 340 mm, sem avarias expressivas, em um tempo total de fresamento de 148 s. A Figura 9 mostra o corpo de prova após a execução do ensaio de fresamento frontal segundo a trajetória *off-set*, destacando que a superfície de Inconel 625 foi totalmente faceada.

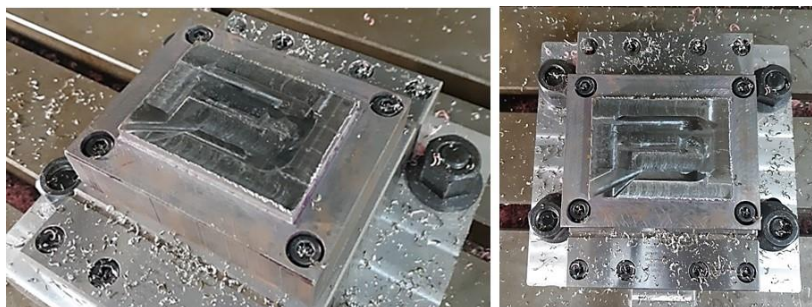


Figura 9. – Superfície de Inconel 625 do corpo de prova logo após a realização do ensaio com a trajetória *off-set*.

Em contrapartida, o fresamento executado com a estratégia longitudinal apresentou maior dificuldade de execução. Esta maior severidade foi evidenciada nos espectros dos sinais dos esforços de corte (Figura 7 (a) e Figura 8 (a)), que mostraram uma taxa crescente ao longo do tempo, alcançando um pico em 127 s de usinagem e um valor de força de usinagem da ordem de 1792 N (Figura 8 (a)), momento em que foi necessário interromper o corte devido a erubescência da ferramenta. Os sinais crescentes de força estão diretamente relacionados com o desgaste da ferramenta que pode ter sido acelerado em função de um acúmulo de rebarba formada a cada passada lateral da ferramenta. Essa rebarba, além de material altamente encruado à frente da ferramenta (Machado *et al.*, 2011), também apresentou dimensões consideráveis, fazendo com que a profundidade de corte efetiva fosse aumentada expressivamente, a cada passada não permitindo que o percurso programado fosse completamente usinado.

Estes resultados concordaram com os encontrados por (Neto *et al.*, 2019), e mesmo utilizando uma penetração de trabalho igual a 70% do diâmetro da fresa o fresamento frontal de faceamento a seco do Inconel 625 com a estratégia longitudinal continuou apresentando problemas relativos a formação de rebarbas a frente do corte, que aumentou a severidade da operação, que agora pôde ser evidenciado através da avaliação dos sinais de força, corroborando com os resultados encontrados nos trabalhos anteriores (Neto *et al.*, 2019).

A Figura 10 mostra o momento em que o ensaio de fresamento frontal de faceamento com a estratégia longitudinal teve que ser interrompido, por questões de segurança, a fim de evitar uma falha catastrófica do conjunto. Pode ser observado o rubor da ferramenta e o percurso de avanço alcançado até o momento da interrupção do ensaio. Uma vez, que foi estimado um Lf de 400 mm programado em função da estratégia longitudinal, a ferramenta conseguiu executar apenas 68,2%, o que correspondeu a um Lf de aproximadamente 273 mm.

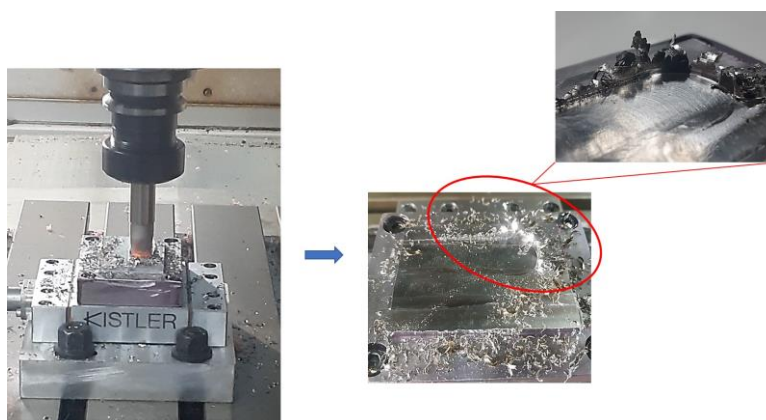


Figura 10. Momento de interrupção do fresamento frontal de faceamento do Inconel 625 segundo a trajetória longitudinal, destacando o superaquecimento da ferramenta enrubescida, as dimensões da rebarba formada e percurso usinado.

A Figuras 11 mostram as rebarbas geradas pela estratégia *off-set*. Para essa estratégia de fresamento do Inconel 625 a rebarba apresentou uma aparência com perfil uniforme com altura entre 1,10 mm e 1,95 mm, e espessura de 0,2 mm. Pode ser observado na Fig. 11 que as rebarbas foram formadas nas bordas da superfície usinada do corpo de prova, e as mesmas se apresentavam curvadas para baixo.



Figura 11. Caracterização visual e por microscopia óptica das rebarbas formadas na superfície de Inconel 625 pelo fresamento frontal de faceamento com a estratégia *off-set*.

As rebarbas provenientes do ensaio com a trajetória longitudinal (Fig. 12) são visivelmente maiores quando comparadas com a *off-set*, principalmente na região crítica onde a ferramenta de corte superaqueceu e o ensaio foi interrompido. Nesta região foi observado um acúmulo de rebarba na lateral no caminho do passe da ferramenta, promovendo um aumento efetivo na profundidade de corte a frente da superfície a ser usinada.

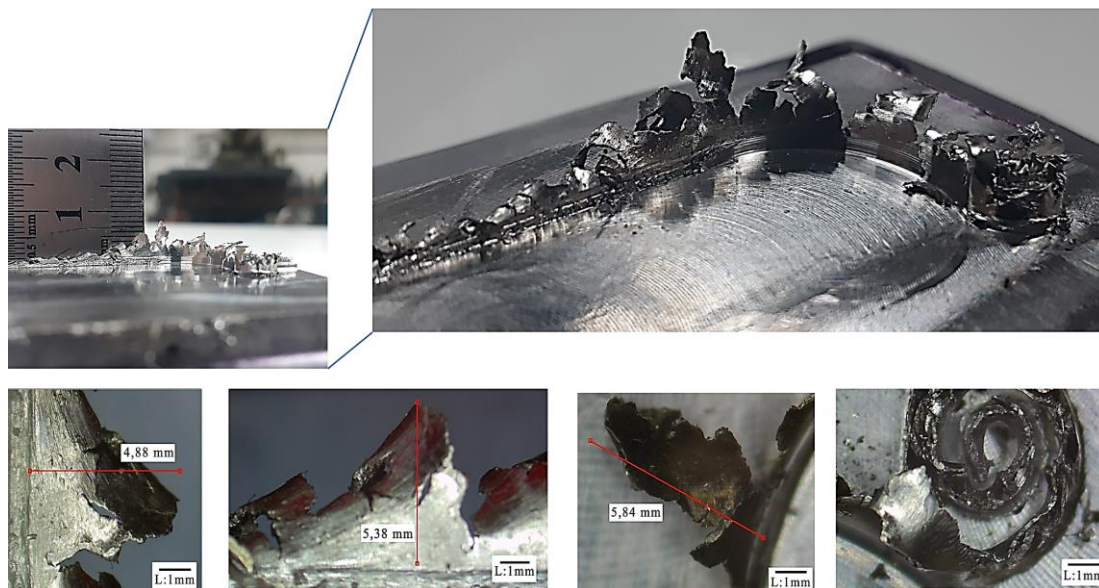


Figura 12. Caracterização visual e por microscopia óptica das rebarbas formadas na superfície de Inconel 625 pelo fresamento frontal de faceamento com a estratégia longitudinal.

Estas rebarbas (Fig. 12) mostraram uma variação na altura e diferentes formatos e sem um curvamento de dobramento, mostrando que a estratégia longitudinal foi menos eficiente na minimização das rebarbas no fresamento de Inconel 625, de forma que a escolha dessa trajetória implicaria em operações adicionais de rebarbação, além de riscos a integridade

física do operador durante a manipulação da peça (Araújo *et al.*, 2020). Estes resultados corroboram mais uma vez com os resultados de trabalhos anteriores (Neto *et al.*, 2019), indicando a melhor eficiência da estratégia *off-set* para o fresamento frontal de faceamento a seco do Inconel 625.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados dos experimentos de fresamento frontal de faceamento a seco de uma superfície de Inconel 625 seguindo duas estratégias de usinagem, longitudinal e *off-set*, pode se concluir que:

- Diferentes estratégias influenciam na severidade da operação de fresamento, alterando os esforços de corte e nas características e dimensões das rebarbas formadas;
- A estratégia *off-set* é mais eficiente em comparação com a trajetória longitudinal, minimizando as dimensões das rebarbas e promovendo seu curvamento. A força de usinagem permaneceu constante durante a execução de todo o percurso programado em com valor médio da ordem de 500 N;
- O fresamento com a estratégia longitudinal não se mostrou eficiente para a usinagem do Inconel 625 para os parâmetros estudados. O sinal de força ao longo do percurso mostrou taxa crescente com pico de 1792 N, e aumento da temperatura caracterizado pelo enrubescimento da ferramenta;
- A estratégia longitudinal executou apenas 68,2% do percurso programado, com enrubescimento da ferramenta;
- Com a baixa usinabilidade e a tendência do Inconel 625 em formar rebarbas, estratégias que apresentam menores valores de força de usinagem e constantes ao longo da trajetória, minimizam as dimensões das rebarbas, e consequentemente a severidade da operação garantindo melhores qualidades da superfície usinada, maiores vidas da ferramenta de corte e redução de custos com etapas adicionais de rebarbação e com energia do sistema.

5. AGRADECIMENTOS

Ao PIIC/PIBIC – UFES 2020/2021 e à FAPES-144/2020 pelo fomento à pesquisa, através da concessão da bolsa de iniciação científica e manutenção do centro de usinagem, respectivamente.

6. REFERÊNCIAS

- Araújo, A.C., Mouro, A.L. e Campos, F.O., 2020. *Usinagem para Engenharia: um curso de mecânica do corte*. Direct Publishing, Rio de Janeiro, Brasil, 344 p.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C. e Coppini, N.L., 2014. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. Artliber, São Paulo, Brasil, 270 p.
- Ferraresi, D., 2011. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. 14ª reimpressão. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 751 p.
- Iscar LTD., 2020. Catálogo eletrônico de Ferramentas de Corte. Manufacturer of Metalworking Tools. Disponível em: <<https://www.iscar.com/eCatalog/Applications.aspx?mapp=ML>>. Acesso em: 15 jul. 2020.
- Machado, Á.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. e da Silva, M.B., 2011. *Teoria da usinagem dos materiais*. 2. ed. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 397 p.
- Neto, V.B., Pereira Junior, R.F. e Barbosa, P.A., 2019. “Investigação do efeito da estratégia de usinagem na eficiência do fresamento de Inconel 625”. In *XXIII Colóquio de Usinagem*. Anais [...], Uberlândia.
- Pereira, S.C., Schützer, K. e Hellen, A.L., 2005 “Influência da Estratégia de Usinagem na Manufatura de Moldes e Matrizes”. In *3º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (3º COBEF)*. Anais [...], Joinville.
- Relvas, C., 2002. *Controlo numérico computadorizado: Conceitos fundamentais*. 2. Ed. Publindústria, Porto, Portugal.
- Sandvik do Brasil S.A., 2007. *Guia de aplicação – Fresamento – boa prática: Estabelecendo fundações sólidas*. Sandvik Coromant, São Paulo, Brasil.
- Scandiffio, I., Diniz, A.E. e Souza, A.F., 2017. “Influência da variação do ângulo da direção de avanço na rugosidade em operações de fresamento de matrizes e moldes”. In *9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (9º COBEF)*. Joinville. Anais do COBEF2017. ABCM, Rio de Janeiro, Brazil. doi://10.26678/ABCM.COBEP2017.COF2017-0508
- Souza, A.F. e Ulbrich, C.B.L., 2013. *Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: Princípios e aplicações*. 2. ed. Artliber, São Paulo, Brasil, 358 p.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

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

STRATEGY MILLING EFFECT ON INCONEL 625 MACHINING FORCE

Iago Areas Cazotto, iago.cazotto@edu.ufes.br¹
Eduardo Sigler Junior, eduardo.sigler@ufes.br¹
Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br¹

¹Federal University of Espírito Santo – Mechanical Engineering Department – Mechanical Technology Laboratory, 29075-910, Vitória/ES, Brazil

Abstract. *Machining automation, which takes place through machine tools controlled by computerized numerical control (CNC) and CAD/CAM systems, contributes to improving the quality and efficiency of the manufacturing process, especially concerning the milling operation, whose cutting tool movements are more complex. Thus, a detailed study for the establishment and consolidation of techniques related to the use of CAD/CAM systems aimed at optimizing machining strategies is relevant, since the tool trajectory has a direct influence on the machining time, cutting efforts, tool wear, and part surface quality, consequently affecting process costs and productivity. In this context, the present work aimed to study the strategy milling effects on the cutting forces and burrs formed in nickel superalloys, classified as poor machinability materials due to their high ductility coupled with a high work hardening rate, in addition to their low thermal conductivity. These characteristics, generally induce the formation of serrated and highly work hardened burrs at the end of the tool-workpiece contact during the milling operation, causing cutting forces and tool wear to be significantly increased. Therefore, comparative practical tests were carried out in two different face milling strategies, called longitudinal and off-set, on AISI 1020 steel surfaces coated by welding with Inconel 625 alloy. The tests were carried out dry, keeping the programmed cutting parameters constant for both trajectories ($v_c = 35$ m/min; $f_z = 0.08$ mm/rev.tooth; $a_p = 0.5$ mm and $a_e = 14$ mm). The milling cutter HM390 ETC D20-3-C20-07 with 20 mm of diameter with capacity for 3 triangular cemented carbide inserts HM390 TCKT 0703 PCTR (S10-S25 ISO grade) were used. The results showed that the off-set trajectory was more efficient than the longitudinal one, since it positively influenced the process by reducing cutting forces and minimizing the dimensions of the burrs formed during dry milling of Inconel 625.*

Keywords: *machining strategies, milling process, Inconel 625, cutting forces, burr*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.