

OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205 UTILIZANDO CARTA DE CONTROLE E ANÁLISE DE CAPACIDADE

Bárbara Salvador Barros Silva¹ (IC), Tarcísio G. Brito (PQ)¹

¹ Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Palavras-chave: Aço inoxidável duplex UNS S32205; Capacidade do processo; Carta de controle; Fresamento de topo; Rugosidade.

Introdução

A operação de fresamento é um dos processos de usinagem amplamente utilizado na indústria por sua flexibilidade, podendo ser confeccionadas superfícies com diversos perfis e com boa precisão dimensional para diferentes tipos de aços (GROOVER, 2010).

O fresamento de topo é o processo no qual o material é removido pelo movimento de rotação da fresa utilizado na fabricação de perfis prismáticos, canais fechados curvos, retos e angulares. Sendo uma das operações mais utilizadas nas indústrias manufatureiras na fabricação de equipamentos para indústrias de petróleo e gás, plataformas offshore, componentes mecânicos e peças resistentes à corrosão fabricadas em aços inoxidáveis (KALIDASS e PALANISAMY, 2014).

Segundo Raymundo *et al.* (2014) a dificuldade na usinagem dos aços inoxidáveis aumenta à medida que elementos de ligas são acrescidos, gerando um desgaste de forma prematura nas ferramentas de corte, reduzindo a qualidade de acabamento da superfície e o tempo de vida útil. A rugosidade constitui-se como um dos parâmetros críticos que influenciam a qualidade da peça usinada, as imperfeições de superfícies são geradas pelos picos e vales presente no processo de usinagem, sendo um dos parâmetros a serem de acordo com o projeto.

Para garantir a qualidade da superfície, faz-se necessário o controle das variáveis do processo que interferem no acabamento final das peças. Os processos produtivos sempre estão sujeitos à variabilidade natural e efeito cumulativo inevitáveis, atribuídas como causas comuns, independente se foram bem projetados ou mantidos (MONTGOMERY, 2013).

Por tal razão, é necessário o desenvolvimento e a utilização de técnicas de metodologias para monitorar e assegurar a qualidade do processo produtivo. O Controle Estatístico de Processos (CEP) destaca-se por ser um método de identificação e análise de variabilidade em processos produtivos, é composto por sete ferramentas, que são utilizadas para monitorar e identificar causas das

variações. Uma das ferramentas do CEP amplamente utilizada é o gráfico de controle que permitem acompanhar visualmente qualquer avaria durante o processo, avaliando se o processo está operando dentro das especificações estabelecidas pelo projeto. Para quantificar a variabilidade do processo em relação às especificações do produto utiliza-se a Análise de Capacidade, outra ferramenta do CEP.

O Gráfico de Controle destaca-se como o principal elemento do Controle estatístico de Processos (CEP), e apresenta a medição da característica de um lote em função do tempo ou número amostral que possibilita monitorar o processo estudado (MONTGOMERY, 2013).

A construção da Carta de Controle é realizada após a fase de aprendizagem, na qual o processo é estável, e então é possível estabelecer o valor médio da qualidade analisada na medição e os limites superior e inferior, que correspondem aos desvios aceitáveis para considerar o processo sob controle.

De acordo com Montgomery (2013), as cartas de controle para variáveis, são as mais utilizadas para inspecionar uma variável independente são os gráficos de controle \bar{X} e \bar{R} média e amplitude, respectivamente. Os limites para os gráficos \bar{X} e \bar{R} são dados de conforme as equações (1 a 6).

$$LSC_X = \bar{x} + \frac{3}{d_2\sqrt{n}} \bar{r} \quad (1)$$

$$LSC_X = \bar{x} - \frac{3}{d_2\sqrt{n}} \bar{r} \quad (2)$$

$$LC_X = \bar{x} \quad (3)$$

$$LSC_R = \bar{r} + \frac{3 d_3}{d_2\sqrt{n}} \bar{r} \quad (4)$$

$$LIC_R = \bar{r} - \frac{3 d_3}{d_2\sqrt{n}} \bar{r} \quad (5)$$

$$LC_R = \bar{r} \quad (6)$$

O procedimento para a construção dos gráficos de controle envolve amostragem de tamanhos fixos em intervalos amostrais. Para essas amostras, calcula-se a média, dispersão e limites específicos do processo. Para a construção do gráfico de controle, amostras de tamanho fixo n devem ser extraídas do processo a ser analisado, que pode ou não ter a mesma periodicidade, que geralmente depende da disponibilidade da amostra, dificuldade de coleta ou mesmo custo (MONTGOMERY, 2013).

\bar{R} é a média das amplitudes de todas as amostras coletadas e são constantes que dependem do tamanho da amostra d_2 e d_3 .

Segundo Montgomery (2013), para que o processo seja considerado sob controle estatístico, os pontos de amostragem devem estar dentro dos limites de controle, além de variar aleatoriamente ao redor da linha central. Pontos fora do limite mostram que o processo está fora de controle, exigindo ações corretivas para eliminar as causas atribuíveis responsáveis pelo desvio.

A Análise de Capacidade é uma ferramenta que utiliza índices para quantificar a variabilidade de um processo. De acordo com Oliveira *et al.* (2011), a Análise de Capacidade é medida pela variabilidade do processo estável em relação às especificações do projeto. Os índices de capacidade comumente utilizados são os C_p e C_{pk} . O índice de capacidade potencial do processo (C_p), considera que está centrado no valor nominal da especificação relacionando a variabilidade especificada ao processo com sua variabilidade natural, de conforme a Equação 7.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (7)$$

Os limites superiores e inferiores de especificação LSE e LIE, respectivamente, e é o desvio padrão (σ). O índice leva em conta a distância da média do processo dos limites de especificação e são calculados conforme a Equação 8:

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma}; \frac{LIE - \bar{X}}{3\sigma} \right\} \quad (8)$$

Se os valores de C_p e C_{pk} forem inferiores a 1, o processo é considerado incapaz. Se os valores estiverem entre 1 e 1,33 o processo é considerado relativamente capaz e se os valores forem maiores que 1,33 o processo é potencialmente capaz. A vantagem do uso desses índices é que eles são dimensionais, facilitando a comparação dos processos produtivos, independentemente do que está sendo produzido (MONTGOMERY, 2013).

Um processo é considerado capaz em relação a uma determinada característica se sua variabilidade natural for menor do que a amplitude dos limites de especificação. Os limites de controle monitoram a existência de causas especiais e a condição de controle estatístico do processo, enquanto os limites de especificação monitoram a capacidade do processo de atender aos requisitos do projeto. Pontos fora do limite mostram que os processos estão fora de controle, o que requer ações corretivas para eliminar as causas atribuíveis responsáveis pelo desvio (SOUZA, 2010).

A pesquisa teve como objetivo na realização da análise da rugosidade da superficial (R_a) no processo por fresamento de topo do aço inoxidável UNS S32205, utilizando Gráficos de Controle e Índice de Capacidade para três velocidades de corte e três diferentes condições de resfriamento. Os parâmetros de entrada desta pesquisa são a velocidade de corte (v_c), alimentação por dente (f_z), profundidade radial de corte (a_e) e profundidade axial de corte (a_p). Para resfriamento, fluxo máximo, fluxo mínimo e sem fluido. O resultado obtido foi a estabilidade de rugosidade para o aço inoxidável UNS S32205, qualidade da superfície usinada variando entre 0,25 μm e 0,55 μm .

Metodologia

Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem CNC da marca Eurostec, com potência de 15kW e rotação máxima de fuso de 10.000 rpm. O suporte da ferramenta utilizada nesta pesquisa foi constituído conforme o código de corte superior R390-025A25-11M, com diâmetro de 25 mm, ângulo de posição $\kappa_r = 90^\circ$, haste cilíndrica, tom médio com 3 inserções e fixação mecânica por grampo. As pastilhas foram de metal duro ISO M30, código R390-11 T3 08M-MM 2030 (Sandvik-Coromant 2018), revestido com (Ti,Al)N +TiN pelo processo de deposição de vapor físico (PVD). O material utilizado no processo de fresagem foi o aço inoxidável duplex UNS S32205, com 115x115x170 mm de comprimento e dureza média de 250 HB. As especificações de produção foram determinadas para rugosidade R_a entre 0,25 e 0,55 μm , especificadas para os limites do gráfico de controle. Para o fim da vida útil da ferramenta, foi adotado o critério de desgaste flanco de $v_{bmax} = 0,30$ mm. Os testes de processo foram realizados com condições fluidas e livres de fluidos, com vazão máxima e mínima, com velocidades de corte (v_c) 60, 65 e 70 m/min. Utilizou-se o fluido óleo sintético MEI quântico com concentração de 5%. Os parâmetros de corte utilizados foram alimentação por dente (f_z) = 0,10 mm/dentes, profundidade de corte (a_p)

fixada em 1,00 mm para todos os experimentos conforme a tabela 1.

Velocidade de corte (v_c) [m/min]	Taxa de vazão de fluido de corte (Q) [l/min]			a_e [mm]	f_z [mm/dente]
	Sem Vazão	Vazão mínima	Vazão máxima		
60	0	0.015	12	1.00	0.10
65	0	0.015	12		
70	0	0.015	12		

Tabela 1- Parâmetros de processo utilizados no processo de Fresamento

Os valores de rugosidade (R_a) foram medidos com um rugosímetro portátil Mitutoyo S/J 201, medindo o corpo de prova em três pontos, no centro e em cada extremidade, a fim de considerar o valor médio das leituras.

Resultados e discussão

Entre as condições testadas, a vazão mínima de fluido com 65 m/min(v_c) apresentou melhor comportamento de rugosidade e um número semelhante de passos na vazão máxima com 60 m/min(v_c) até o fim da vida útil da ferramenta de 0,30 mm adotada.

As medidas de rugosidade superficial apresentaram um aumento nos valores à medida que a ferramenta se aproxima do final da vida útil influenciando qualidade da superfície usinada conforme as figuras 1 a 3:

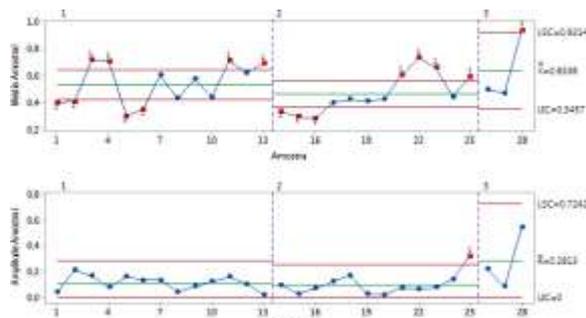


Figura 1 - Valores de R_a (μm) obtidos no experimento com $V_c = 60$ m/min

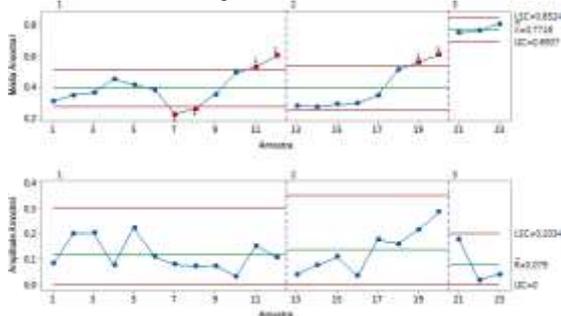


Figura 2 - Valores de R_a (μm) obtidos no experimento com $V_c = 65$ m/min

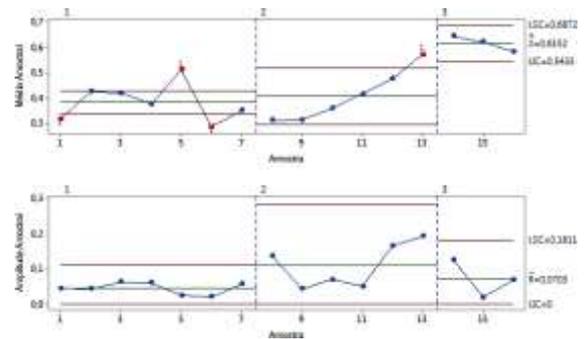


Figura 3- Valores de R_a (μm) obtidos no experimento com $V_c = 70$ m/min

A Análise de Capacidade foi realizada para experimentos com velocidades de corte de 60, 65 e 70 m/min utilizando taxa mínima de fluxo, de acordo com as Figuras de 4 a 6, para verificar em que condição o processo opera dentro das especificações definidas, em estudo da capacidade é relevante diferenciar um processo estável do capaz.

Observa-se que para velocidades iguais a 60 e 65 m/min, apesar de considerado estável, é incapaz e operando fora dos limites de especificação, com índices e C_p inferior a C_{PK} 1 (um). Desta forma, não é capaz de produzir peças com a qualidade especificada pelo projeto.

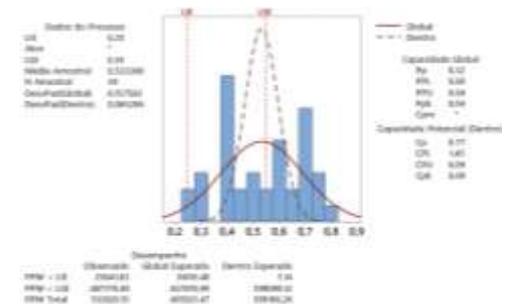


Figura 4 - Análise da Capacidade do processo para $V_c = 60$ m/min

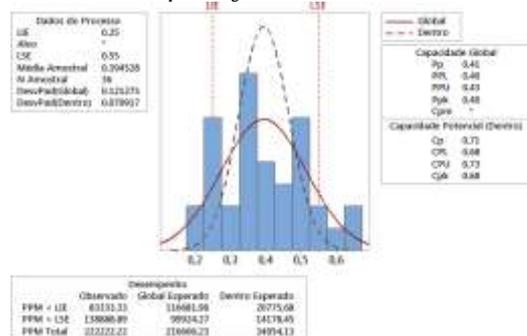


Figura 5 - Análise da Capacidade do Processo para $V_c = 65$ m/min

Os valores de C_{PK} dos processos com velocidade de corte igual a 70 m/min é potencialmente capaz de operar dentro dos limites de especificação, com índices e superior a 1,33, como mostra a C_{PK} Figura 6, o processo está atendendo à qualidade da superfície especificada do projeto. Para a velocidade de 70 m/min, apenas sete experimentos foram obtidos, resultando no menor comprimento de corte, foi devido à baixa usinabilidade do material.

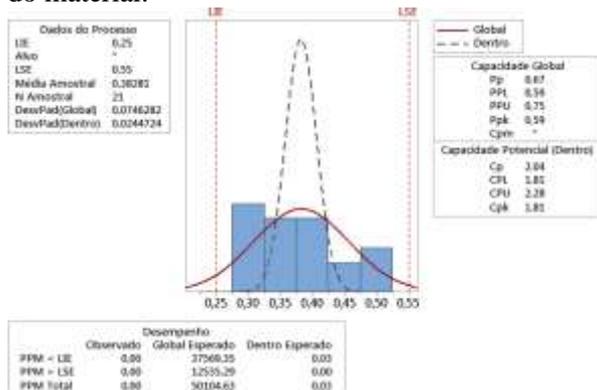


Figura 6 - Análise da Capacidade do Processo para $V_c = 70$ m/min

Foi possível obter a análise de capacidade através da aplicação dos Gráficos de Controle, verificou-se uma estabilidade moderada com velocidades de corte de 65 m/min e 70 m/min para a mínima taxa de vazão. Além disso, também foi obtida a análise da capacidade dos considerados estáveis para operar dentro da especificação necessária de rugosidade da peça entre 0,25 e 0,55 μ m, mostrando que apenas o processo com velocidade de 70 m/min é capaz de operar dentro dos limites de especificação e atendendo à qualidade exigida pelo projeto.

Análises estatísticas revelaram que apesar de obter valores de R_a fora dos limites de controle, o projeto pode ser considerado, pois no experimento os valores de rugosidade foram percebidos abaixo do especificado no projeto. Esse fato torna-se um ganho devido à rugosidade que exige os menores valores possíveis em termos de qualidade superficial, demonstrando que, embora o processo seja difícil de ser controlado, é possível fabricar as peças de acordo com o projeto com índice de capacidade satisfatório.

Conclusões

Os experimentos com maiores velocidades de corte mostraram-se capazes de atender às especificações. É possível observar que mesmo processos estáveis podem não ser capazes de atender às especificações definidas. Considerando a qualidade da superfície medida para R_a aspereza, valores abaixo dos limites especificados podem

ser considerados no desenho. Em relação ao processo final de moagem, pode-se afirmar que o uso de fluido de corte ajuda na redução dos valores de rugosidade. Os menores R_a valores observados foram obtidos com a taxa mínima de fluxo e fluxo máximo durante o experimento. A aplicação da vazão mínima de fluido de corte, além de obter boa estabilidade no processo, contribui para diminuição dos custos da operação e a saúde dos operadores. A alimentação por dente $f_z=0,10$ mm/dente e as velocidades de corte (v_c) a 70 m/min minimiza a condição de sazonalidade na rugosidade da superfície, conforme especificado pelo processo.

Agradecimento

À mineradora Vale S.A pelo apoio financeiro através do edital: UNIFEI/VALE S.A nº 01/2020, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Grupo de Estudos em Qualidade e Produtividade (GEQProd) da Universidade Federal de Itajubá, campus de Itabira, Grupo de Pesquisa em Gestão Energética e Fabricação (InGED) campus Itabira, Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão de Itajubá (Fapepe) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio para a realização deste trabalho.

Referências

- GROOVER, M. P., 2010, "Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems". John Wiley & Sons, Inc., 4th ed.
- KALLIDASS, S.e PALANISAMY, P., 2014. "Experimental Investigation on the Effect of Tool Geometry and Cutting Condition Using Tool Wear Prediction Model for End Milling Process", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 89, p. 95-109.
- MONTGOMERY, D. C. Introdução ao controle estatístico da qualidade. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- OLIVEIRA, J. B.; et. Al. Análise da capacidade de um processo: Um estudo de caso baseado nos indicadores Cp e Cpk. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Belo Horizonte, 2011.
- RAYMUNDO, Emerson Augusto et al. Análises dos cavacos gerados no processo de fresamento do aço inoxidável duplex uns s31803 (saf 2205), como recebido. Revista de Gestão & Tecnologia, [S.l.], v. 2, n. 1, dez. 2014. ISSN 2358-3126.
- SOUZA, D. C. S.; CAMPOS, M. S.; RODRIGUES, M. D. A utilização de gráficos de controle e análise de capacidade em uma empresa siderúrgica de minas gerais. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, São Carlos, 2010.