

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

OTIMIZAÇÃO ROBUSTA BASEADA NO MÉTODO DE INTERSEÇÃO NORMAL À FRONTEIRA DA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL E CIRCULARIDADE TOTAL NO PROCESSO DE FRESAMENTO HELICOIDAL

Aline Cunha Alvim, ca.aline@yahoo.com.br¹
Robson Bruno Dutra Pereira, robsondutra@ufsj.edu.br²
Frederico Ozanan Neves, fred@ufsj.edu.br³
João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br⁴
Anderson Paulo de Paiva, andersonppaiva@unifei.edu.br⁵

¹Universidade Federal de São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro. CEP 36307-352. São João del Rei, MG.

²Universidade Federal de Itajubá, Avenida BPS, 1303, Pinheirinho. CEP 37500-903. Itajubá, MG.

Resumo: O processo de fresamento helicoidal interpolado tem-se apresentado como alternativa ao processo de furação convencional para obtenção de furos usinados, uma vez que pode-se obter furos com melhor qualidade de forma, menor consumo de energia, redução de setups, entre outras vantagens. Considerando o trade-off existente entre qualidade e produtividade, o presente estudo apresenta a modelagem e otimização multiobjetivo da taxa de remoção de material $MRR [cm^3/min]$, variável de produtividade, e da circularidade total $Ron_t [\mu m]$, variável de qualidade, sendo a primeira resposta determinística e a segunda probabilística, no processo de fresamento helicoidal do Al7075. Utilizou-se um planejamento composto central, considerando parâmetros de processo e de ruído, a fim de modelar as funções de média e variância da resposta Ron_t , e otimizar o processo tornando-o robusto à variação do fator de ruído avaliado. A variável taxa de remoção de material, relacionada matematicamente aos parâmetros dos processos de usinagem, foi apenas descrita em termos de parâmetros específicos do processo de fresamento helicoidal. Os métodos de interseção normal à fronteira e erro quadrático médio foram utilizados na obtenção de um arranjo de soluções Pareto ótimas para a otimização não linear biobjetivo das respostas avaliadas. O parâmetro de ruído considerado foi o comprimento em balanço da ferramenta, uma vez que na usinagem de cavidades o comprimento em balanço não depende da escolha do experimentador, mas da geometria a ser usinada. Por meio da metodologia proposta, as respostas MRR e Ron_t foram otimizadas tornando-se robustas à variação da variável ruído.

Palavras-chave: Fresamento Helicoidal; Circularidade Total; Taxa de Remoção de Material; Projeto de Parâmetro Robusto; Método de Interseção Normal à Fronteira.

1. INTRODUÇÃO

O processo de produção de furos representa cerca de 50% dos processos de usinagem (Karnik *et al.*, 2008, *apud* WANG *et al.*, 2015), sendo a furação convencional uma das operações mais importantes nas operações de corte de metal. Geralmente realizada nas últimas etapas de fabricação de peças, o processo de furação demanda alta confiabilidade uma vez que considerável valor econômico já lhe foi atribuído (TONSHOFF *et al.*, 1994).

Este trabalho apresenta o fresamento helicoidal interpolado (FHI) como uma alternativa à furação convencional para produção de furos com alta qualidade em materiais difíceis de usar. No FHI a furação é realizada por uma fresa que, além de rotacionar em torno do próprio eixo, descreve uma trajetória helicoidal ao redor do centro do furo (DENKINA *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2015; FANG *et al.*, 2015).

O FHI apresenta vantagens como: proporcionar maior vida útil à ferramenta, melhor precisão dimensional, baixas forças de corte, ser um processo de corte intermitente, menor temperatura de corte, erro de forma e formação de rebarba e bom transporte de cavaco. A cinemática do FHI ainda permite a produção de diferentes diâmetros de furos por meio do ajuste do passo helicoidal (SASAHARA *et al.*, 2008; QUIN *et al.*, 2009, *apud* QIN *et al.*, 2012; LI; LIU, 2013; FANG *et al.*, 2015).

O estudo em questão, além de fatores de processo/controle, considera o comprimento em balanço da ferramenta como uma variável ruído, uma vez que é um fator controlável pelo experimentador, mas incontrollável na prática, pois

depende da geometria da peça a usinar. Sendo assim, esta pesquisa aplica o Projeto de Parâmetro Robusto, do inglês *Robust Design Problem* – RPD, que se constitui de um conjunto de técnicas que determina os níveis ótimos dos fatores de controle que diminuirão a sensibilidade do processo às variações da variável ruído; aumentando assim, a robustez do processo (ARDAKANI; NOOROSSANA, 2008; SHIN *et al.*, 2011; BRITO *et al.*, 2014).

A finalidade deste artigo é abordar a otimização biobjetivo do parâmetro de circularidade total Ron_t [μm], variável probabilística, e da taxa de remoção de material MRR [cm^3/min], variável determinística, que representam respostas de qualidade e produtividade, respectivamente. Para tanto, aplica-se o conceito de Otimidade de Pareto de forma a encontrar um arranjo de pontos que são ótimos no *trade-off* entre as variáveis de resposta (COLLETE; SIARRY, 2004, *apud* MOTTA *et al.*, 2012). O método Interseção Normal à Fronteira, do inglês *Normal Boundary Intersection* – NBI, foi então utilizado na busca pelas soluções Pareto ótimas para Ron_t [μm] e MRR [cm^3/min].

A furação por fresamento helicoidal tem sido abordada em inúmeras pesquisas devido a sua grande aplicabilidade na produção de furos com alta qualidade superficial. Denkena *et al.* (2008) investigaram o impacto dos avanços axial e tangencial na qualidade do furo e forças do processo no fresamento helicoidal do compósito TiAl6V4. Sasahara *et al.* (2008) estudaram o fresamento helicoidal com MQL na liga de alumínio A5052. Yicai *et al.* (2011) estudaram a influência do avanço na força de corte e na qualidade do furo no fresamento helicoidal da liga de alumínio aeroespacial 6061. Li & Liu (2013) criaram um modelo de simulação de superfície topográfica em 3D para simular o perfil final da superfície gerado após o fresamento helicoidal com fresa de topo cilíndrica. A partir da simulação, parâmetros da rugosidade puderam ser deduzidos. Zhao *et al.* (2015) investigaram a vida da ferramenta e a integridade superficial do furo na liga Ti6Al4V nos processos de fresamento helicoidal e furação convencional.

2. FRESAMENTO HELICOIDAL INTERPOLADO

2.1. Cinemática do FHI

Na furação por fresamento helicoidal a ferramenta realiza três movimentos simultâneos durante a produção do furo: rotação em torno do próprio eixo, avanço ao longo da direção axial e revolução em torno do eixo do furo (YICAI *et al.*, 2011). A Fig. 1 ilustra a cinemática do processo. Diferentemente da furação convencional, na qual o diâmetro do furo é determinado pelo diâmetro da broca helicoidal, no FHI o diâmetro do furo é uma combinação do diâmetro da ferramenta e do diâmetro do passo helicoidal (DENKENA *et al.*, 2008). Como citado anteriormente, a flexibilidade relacionada ao diâmetro do furo caracteriza mais uma vantagem do FHI.

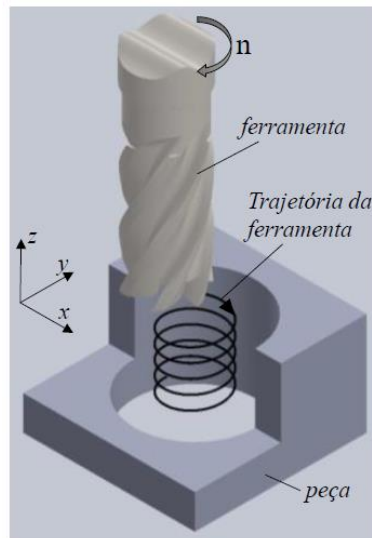


Figura 1. Cinemática do Fresamento Helicoidal Interpolado.

A cinemática do FHI ocorre nos três eixos da máquina ferramenta, sendo necessário calcular a velocidade de avanço (v_f), em mm/min - que está relacionada à velocidade da ferramenta no centro do furo, e a profundidade de corte por rotação helicoidal (a_p), em mm, ou ângulo de hélice (α), em graus. O avanço axial por dente (f_{za}), em mm/revolução, avanço tangencial por dente (f_{zt}), em mm/revolução, diâmetro do furo (D_b), em mm, diâmetro da hélice (D_h), em mm, revolução por minuto (n), em RPM, e número de dentes (z) da ferramenta são os parâmetros de entrada para cálculo de v_f e a_p . A velocidade de avanço helicoidal (v_f) pode ser decomposta em velocidade de avanço axial (v_{fha}) e velocidade de avanço tangencial (v_{fht}), conforme Eq. (1). Ambas dependem de z , n e f_{za} e f_{zt} da ferramenta. Diâmetros do furo e da hélice também são necessários para o cálculo de v_{fht} , conforme Eq.(2), (3) e (4) (DENKENA *et al.*, 2008). A Fig. 2 ilustra os parâmetros de corte supracitados.

$$v_f = \sqrt{v_{fha}^2 + v_{fht}^2} \quad (1)$$

$$v_{fha} = f_{za} \cdot z \cdot n \quad (2)$$

$$v_{ft} = f_{zt} \cdot z \cdot n \quad (3)$$

$$v_{fht} = v_{ft} \cdot \frac{D_h}{D_b} \quad (4)$$

Na Eq. (3), v_{ft} é a velocidade de avanço tangencial, em mm/min. A Eq. (5) define a profundidade de corte por rotação helicoidal (a_p), considerando o ângulo de hélice (α) definido pela Eq. (6).

$$a_p = \tan(\alpha) \cdot \pi \cdot D_h \quad (5)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v_{fha}}{v_{fht}}\right) \quad (6)$$

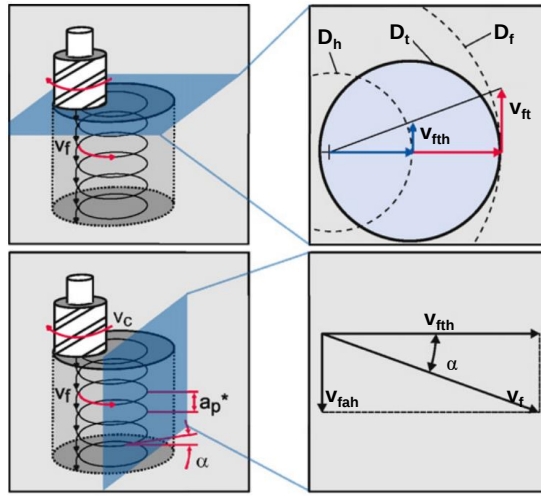


Figura 2. Parâmetros de corte (adaptado de Denkena *et al.*, 2008).

2.2. Respostas estudadas

As respostas avaliadas nesta pesquisa foram: circularidade total Ron_t , em μm , e a taxa de remoção de material MRR , em cm^3/min . Estão relacionadas a parâmetros de qualidade e produtividade, respectivamente.

Ron_t é a resposta mais comum para avaliar a circularidade de furos e eixos. Ela corresponde à distância entre dois círculos concêntricos que abrangem o perfil mensurado pelo instrumento. A Fig. 3 apresenta um perfil de circularidade com $Ron_t = 6,02 \mu\text{m}$.

Já MRR é uma resposta de produtividade determinística, sendo definida genericamente para processos de usinagem convencionais conforme a Eq. (7). Desenvolvendo a Eq. (7), considerando os parâmetros do processo de fresamento helicoidal, obtém-se a Eq. (8).

$$MRR = f \cdot a_p \cdot v_c \quad (7)$$

$$MRR = \sqrt{(f_{za} \cdot z)^2 + \left(f_{zt} \cdot z \cdot \frac{D_h}{D_b}\right)^2} \cdot \left(\frac{f_{za}}{f_{zt}}\right) \cdot \pi \cdot D_b \cdot v_c \quad (8)$$

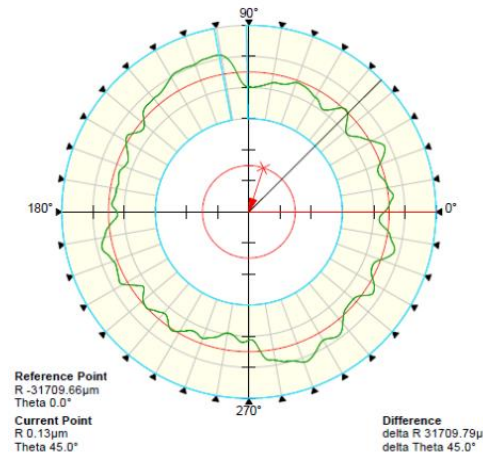


Figura 3. Perfil de circularidade.

3. PROJETO DE PARÂMETRO ROBUSTO E INTERSEÇÃO NORMAL A FRONTEIRA

O Projeto de Parâmetro Robusto – RPD é uma abordagem que, a partir da escolha dos níveis dos fatores de controle em um processo, busca atingir dois objetivos: garantir que a média da variável resposta se aproxime do nível desejado (alvo) e garantir que a variabilidade em torno desse alvo seja a menor possível. Além do delineamento de processos que produzirão o mais próximo possível das especificações, o RPD busca o delineamento de sistemas que sejam insensíveis a fatores ambientais que na prática podem afetar seu desempenho. A esses fatores, que na prática não se tem controle e causam variabilidade nas variáveis de resposta de um processo, dá-se o nome de variável ruído. O RPD, de forma geral, identifica as variáveis de processo e ruído que afetam a performance do processo ou produto e, então, encontra os níveis para as variáveis de controle que minimizarão a variabilidade transmitida pela variáveis ruído (MONTGOMERY, 2012).

A Metodologia de Projetos de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*) é utilizada neste estudo e segundo Montgomery (2012) é uma abordagem estatística que foca no planejamento de experimentos para geração de dados apropriados para uma análise estatística eficaz.

Este estudo utiliza os Fatoriais Completos e a Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology – RSM*) e, considerando uma estratégia de experimentação sequencial, realiza inicialmente um planejamento fatorial com pontos centrais. A partir da experimentação fatorial obtém-se um modelo com termos lineares e de interação para cada resposta por meio do Método dos Mínimos Quadrados. Os pontos centrais servem para estimar o erro experimental, além de testar a presença de curvatura na região experimental. Em caso de curvatura significativa, mais ensaios são realizados nos pontos axiais, isto é, extremos aos níveis fatoriais, para estimar os termos quadráticos do modelo, completando o arranjo CCD (MONTGOMERY, 2013). A Fig. 4 apresenta o planejamento CCD para dois fatores ($k = 2$), sendo ρ : o raio da esfera, definido na Eq. (9); os pontos azuis: os pontos fatoriais; o ponto alaranjado: os pontos centrais; e os pontos amarelos: os pontos axiais.

$$\rho = \sqrt[4]{2^k} \quad (9)$$

De acordo com Montgomery (2013), os delineamentos que consideram tanto os fatores de controle quanto os de ruído em um único arranjo são chamados de Arranjos Combinados. Neste tipo de arranjo as interações entre os fatores de controle e de ruído podem ser avaliadas, permitindo a obtenção de um modelo para média e outro para variância a partir da propagação de erro do modelo original.

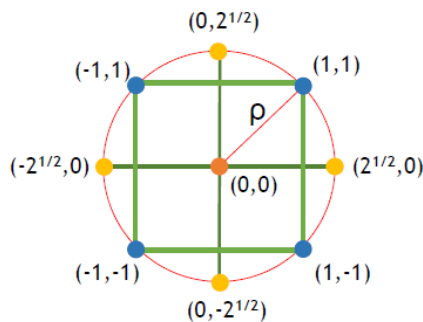


Figura 4. Demonstração do arranjo CCD.

Para viabilizar o RPD, o arranjo combinado deve desconsiderar os pontos axiais referentes aos fatores de ruído. Assim, por meio dos Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least Squares* – OLS) ou Mínimos Quadrados Ponderados (*Weighted Least Squares* – WLS) pode-se obter um modelo de resposta ou superfície polinomial $y(x,z)$ e através da propagação de erro encontrar o modelo de variância da resposta sob investigação, além do modelo de média $E[y(x,z)] = y(x)$ (ARDAKANI; NOOROSSANA, 2008; PAIVA *et al.*, 2014). As Eq. (10), (11) e (12) representam, segundo o problema RPD-RSM, modelo de resposta, modelo para média e modelo para variância, respectivamente.

$$y(x,z) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^r \gamma_i z_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \delta_{ij} x_i z_j + \varepsilon \quad (10)$$

$$E_z[y(x,z)] = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 \quad (11)$$

$$V_z[y(x,z)] = \sum_{i=1}^r \left[\frac{\partial y(x,z)}{\partial z_i} \right]^2 \sigma_{z_i}^2 + \sigma^2 \quad (12)$$

O método de otimização não linear Erro Quadrático Médio (*Mean Square Error* – MSE), proposto por Lin & Tu (1995), combina a média, a variância e o alvo - ponto ótimo para $y(x)$ e foi aplicado na otimização dual das funções média e variâncias derivadas do modelo de resposta para Ron_t . MSE é a função objetivo sujeita a restrição de espaço experimental (ARDAKANI; NOOROSSANA, 2008; PAIVA, DE *et al.*, 2014; SHIN *et al.*, 2011). Como pode haver situações em que a média e a variância tenham que assumir diferentes graus de importância, a função MSE pode ser modificada considerando pesos ω_1 e ω_2 como constantes positivas previamente especificadas (LIN; TU, 1995; TANG; XU, 2002). Os pesos podem ser experimentados a partir de várias combinações convexas que considerem $\omega_1 + \omega_2 = 1$, sendo $\omega_1 > 0$ e $\omega_2 > 0$ e, variando-se os pesos pode-se elaborar um arranjo de soluções não inferiores para o problema de otimização multiobjetivo (TANG; XU, 2002). O problema de otimização é apresentado, então, como:

$$\begin{aligned} \text{Min MSE} &= \omega_1 (\hat{\mu} - T)^2 + \omega_2 \hat{\sigma}^2 \\ \text{S.t. } \therefore \mathbf{x}^T \mathbf{x} &\leq \rho^2; \\ \omega_1 + \omega_2 &= 1 \\ \omega_1 &> 0 \\ \omega_2 &> 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Onde: $\hat{\mu}$: função média para a resposta; T : alvo; $\hat{\sigma}^2$: função variância para a resposta e a restrição refere-se ao espaço experimental, ou seja, a região definida pelos níveis dos fatores de controle adotados nos experimentos.

Conforme Motta *et al.* (2012), técnicas de otimização multiobjetivo permitem uma modelagem com comportamento mais realista. Desse modo, considera-se o conceito de Otimalidade de Pareto fundamental para o problema de otimização multiobjetivo. Ela provê um arranjo de pontos que são ótimos na relação de troca entre as variáveis objetivos (COLLETE; SIARRY, 2004, *apud* MOTTA, *et al.*, 2012), já que dificilmente um ponto ótimo minimizará simultaneamente mais de uma função objetivo (DAS; DENNIS, 1998). Um método utilizado na busca pelas soluções Pareto Ótimas para um problema multiobjetivo não linear foi proposto por Das & Dennis (1998) e chamado de Método Interseção Normal à Fronteira. Por meio do NBI, pode-se traçar uma curva de soluções Pareto Ótimas para Ron_t [μm] e MRR [cm^3/min].

A otimização por meio do método NBI inicia-se no desenvolvimento da matriz *payoff* Φ que baseia-se na otimização individual de cada função objetivo. Sua notação matricial, considerando $F(x)$ e $G(x)$ como as funções objetivo para a média e variância, respectivamente, pode ser escrita conforme Eq. (14).

$$\phi = \begin{bmatrix} F^*(x_1^*) & F(x_1^*) \\ G(x_2^*) & G^*(x_2^*) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Na qual $F^*(x_1^*)$ corresponde ao mínimo (utopia) de $F(x)$ enquanto $F(x_1^*)$ corresponde ao máximo (nadir) para $F(x)$, quando a variável depende x_2^* é aplicada a função objetivo $F(x)$. O mesmo raciocínio pode ser empregado para $G(x)$. A partir desses valores as funções objetivo podem ser normalizadas a partir dos seguintes cálculos:

$$\bar{F}(x) = \frac{F(x) - F^*(x_1^*)}{F(x_1^*) - F^*(x_1^*)} \quad (15)$$

$$\bar{G}(x) = \frac{G(x) - G^*(x_2^*)}{G(x_2^*) - G^*(x_2^*)} \quad (16)$$

Diferentes configurações podem ser propostas para definir a matriz *payoff* e as funções normalizadas apresentadas acima. Neste estudo, $F(x)$ e $G(x)$ são, nesta ordem, a função $MSE-Ron_t$ e MRR . Para problemas bidimensionais o problema de otimização NBI pode ser escrito como ilustra a Eq. (17).

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \bar{F}(x) \\ \text{S.t.:} \quad & \bar{F}(x) - \bar{G}(x) + 2w - 1 = 0 \\ & \mathbf{x}^T \mathbf{x} \leq \rho^2 \end{aligned} \quad (17)$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As operações por FHI foram realizadas em uma *ROMI Discovery 560* com velocidade e potência máxima de 10000 RPM e 15 KW, respectivamente, equipada com um controle numérico modelo *Siemens 810D Sinumeric*. Foram realizados 26 experimentos em corpos de prova cilíndricos de Al7075, com 23 mm de diâmetro e 14 mm de altura, conforme Fig. 5. Foram consideradas três variáveis de controle: velocidade de corte (v_c , m/min), avanço axial por dente (f_{za} , mm/min), avanço tangencial por dente (f_{zt} , mm/min); e uma de ruído: comprimento em balanço (l_b , mm). Os ensaios foram realizados com uma fresa de metal duro com 10 mm de diâmetro, 4 dentes e 30° de ângulo de hélice. Um Rugosímetro *Form Talysurf Intra* foi utilizado para medição da circularidade total Ron_t das peças usinadas. A taxa de remoção de material MRR não foi medida, mas calculada, por meio da Eq. (8), por ser uma resposta determinística.

A metodologia desta pesquisa pode ser resumida no fluxograma exposto na Fig. 6.



Figura 5. Corpo de prova de Al7075.

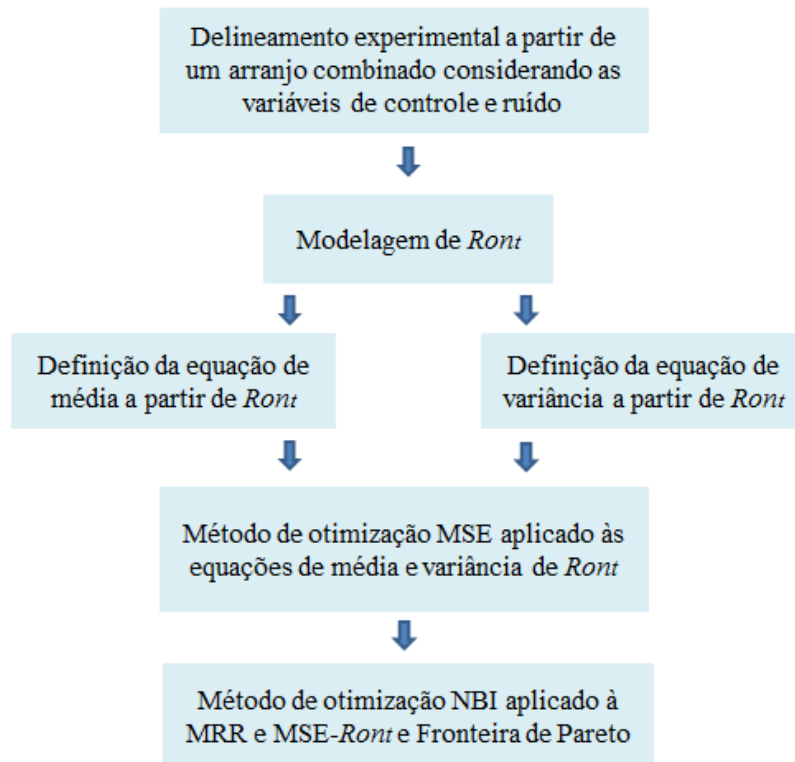


Figura 6. Fluxograma referente a metodologia aplicada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta o planejamento experimental considerando as variáveis de controle e a variável ruído e as respostas medidas e calculadas, respectivamente.

Tabela 1. Planejamento experimental e respostas

Ensaio	Variáveis de Controle			Ruído	Respostas	
	f_{za} [mm/dente]	f_{zt} [mm/dente]	v_c [m/min]	l_b [mm]	Ron_t [μm]	MRR [cm³/min]
1	0,004	0,04	30	30	7,08	7,87
2	0,011	0,04	30	30	7,99	26,88
3	0,004	0,09	30	30	6,93	7,61
4	0,011	0,09	30	30	11,73	22,08
5	0,004	0,04	70	30	9,07	18,37
6	0,011	0,04	70	30	7,19	62,72
7	0,004	0,09	70	30	7,35	17,75
8	0,011	0,09	70	30	7,49	51,53
9	0,004	0,04	30	46	5,2	7,87
10	0,011	0,04	30	46	12,09	26,88
11	0,004	0,09	30	46	5,11	7,61
12	0,011	0,09	30	46	7,15	22,08
13	0,004	0,04	70	46	7,9	18,37
14	0,011	0,04	70	46	13,5	62,72
15	0,004	0,09	70	46	9,04	17,75
16	0,011	0,09	70	46	8,37	51,53
17	0,0005	0,065	50	38	7,95	1,57
18	0,0145	0,065	50	38	11,45	54,81
19	0,0075	0,015	50	38	9,96	42,48
20	0,0075	0,115	50	38	8,33	24,01
21	0,0075	0,065	10	38	10,18	4,99
22	0,0075	0,065	90	38	9,89	44,88
23	0,0075	0,065	50	38	6,06	24,93
24	0,0075	0,065	50	38	8,1	24,93
25	0,0075	0,065	50	38	7,53	24,93
26	0,0075	0,065	50	38	6,96	24,93

A Eq. (18) representa o modelo de resposta para Ron_t , em unidades codificadas, obtido através do WLS conforme Eq. (10). O modelo apresentou bom ajuste com $R^2 = 98,41\%$, $R^2_{(adj)} = 96,69\%$, $R^2_{(pred)} = 85,42\%$ e p-valor para o teste de *lack-of-fit* (LOF) igual a 0,361, significando que o modelo obtido não apresenta falta de ajuste.

$$Ron_t(x, z) = 6,962 + 0,980f_{za} - 0,370f_{zt} + 0,110v_c + 0,136l_b + 0,635f_{za}^2 + 0,540f_{zt}^2 + 0,679v_c^2 - 0,315f_{za} \times f_{zt} - 0,831f_{za} \times v_c + 0,587f_{za} \times l_b - 0,307f_{zt} \times v_c - 0,836f_{zt} \times l_b + 0,794v_c \times l_b \quad (18)$$

As funções de média e variância para Ron_t também foram calculadas conforme Eq. (11) e (12), respectivamente, e são representadas pelas Eq. (19) e (20). $Ron_t(x)$ representa a função para a média e $\sigma^2(x)$ a função para a variância.

$$Ron_t(x) = 6,962 + 0,980f_{za} - 0,370f_{zt} + 0,110v_c + 0,635f_{za}^2 + 0,540f_{zt}^2 + 0,679v_c^2 - 0,315f_{za} \times f_{zt} - 0,831f_{za} \times v_c - 0,307f_{zt} \times v_c \quad (19)$$

$$\sigma^2(x) = (0,136 + 0,587f_{za} - 0,836f_{zt} + 0,794v_c)^2 + 1,471 \quad (20)$$

As Eq. (19) e (20) foram aglomeradas em uma única função objetivo conforme a apresentada na Eq. (13), a fim de otimizar o erro quadrático médio (MSE) da circularidade. Já a resposta MRR [cm^3/min], por ser determinística, não foi modelada, sendo utilizada a Eq. (8) no problema de otimização. Neste sentido, foi utilizado o método NBI, apresentado na Eq. (17) para otimização dual de $MSE-Ron_t$ e MRR .

A otimização individual para as funções conduziram aos pontos ótimos (utopia) $\xi_{MRR} = 63,301$ e $\xi_{MSE_Ron_t} = 1,750$. A matriz *payoff* contendo os pontos de utopia e nadir são, então, apresentados na Tab. 2. Deve-se salientar que, enquanto o erro quadrático médio deve ser minimizado, a fim de garantir que a circularidade se aproxime do alvo e sua variância seja minimizada, afetando positivamente a qualidade da peça, a taxa de remoção de material deve ser maximizada de modo a aumentar a produtividade do processo.

Tabela 2. Matriz *payoff*.

63,301	13,163
17,999	1,750

Considerando os pontos de utopia e nadir e os diferentes pesos, a normalização - Eq. (15) e (16) - foi realizada e o método de otimização NBI - Eq. (17) - aplicado. Os resultados da otimização estão resumidos na Tab. 3. A fronteira de Pareto usando o método NBI foi então plotada na Fig. 7.

Tabela 3. Resultados da otimização NBI para $MSE-Ron_t$ e MRR .

w	f_{za} [mm/dente]	f_{zt} [mm/dente]	v_c [m/min]	MRR [cm^3/min]	MSE_Ron_t [μm]
0,00	-0,813	-0,462	-0,323	13,163	1,750
0,05	-0,501	-0,102	-0,092	18,041	1,794
0,10	-0,245	0,181	0,108	22,644	1,927
0,15	-0,031	0,399	0,285	26,968	2,150
0,20	0,152	0,563	0,441	31,033	2,458
0,25	0,313	0,696	0,581	34,870	2,839
0,30	0,456	0,805	0,709	38,511	3,284
0,35	0,585	0,896	0,825	41,983	3,784
0,40	0,703	0,978	0,933	45,306	4,332
0,45	0,813	1,050	1,032	48,500	4,921
0,50	0,927	0,905	1,072	51,388	5,611
0,55	1,017	0,760	1,102	53,836	6,442
0,60	1,090	0,616	1,123	55,913	7,394
0,65	1,148	0,474	1,134	57,672	8,449
0,70	1,194	0,333	1,136	59,152	9,594
0,75	1,230	0,194	1,130	60,384	10,820
0,80	1,257	0,055	1,116	61,391	12,118
0,85	1,275	-0,083	1,094	62,187	13,485
0,90	1,286	-0,222	1,061	62,779	14,918
0,95	1,288	-0,364	1,018	63,160	16,420
1,00	1,282	-0,513	0,960	63,301	17,999

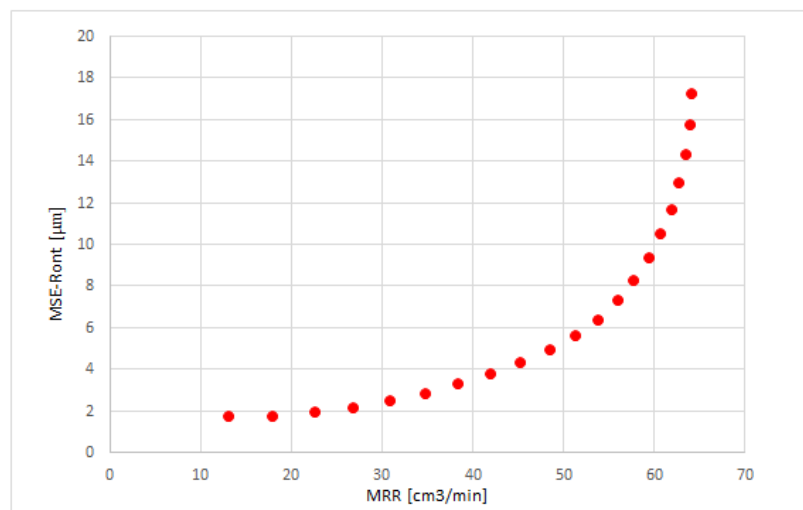


Figura 7. Fronteira de Pareto NBI aplicado a MRR - MSE_Ron_t .

6. CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresentou o processo de fresamento helicoidal como uma alternativa ao processo de furação convencional. A partir de um planejamento composto central um arranjo combinado, considerando as variáveis de processo e ruído, foi utilizado e, após a realização dos ensaios experimentais, a modelagem da variável de resposta Ron_t e otimização dual das variáveis determinística e probabilística, MRR e Ron_t , respectivamente, foi realizada. Os métodos de otimização Erro Quadrático Médio e Interseção Normal à Fronteira foram aplicados e o conceito de Otimalidade de Pareto foi implementado, resultando na construção de uma fronteira contendo as soluções Pareto ótimas para o problema robusto.

Através da metodologia proposta as respostas sob análise MRR e Ron_t foram otimizadas e tornaram-se robustas a variação do fator ruído: comprimento em balanço da ferramenta.

Conforme Tab. 3, um peso igual a 0 prioriza a otimização da resposta MSE_Ron_t , enquanto um peso igual a 1 prioriza a otimização da resposta MRR . De acordo com esta pesquisa, em futuros ensaios de confirmação, fixando f_{za} em 0,927 mm/dente, f_{zt} em 0,905 mm/dente e v_c em 1,072 m/min, em unidades codificadas, MRR e Ron_t devem alcançar 51,388 cm³/min e 5,611 µm, respectivamente.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio nesta pesquisa e ao técnico Camilo Lellis dos Santos pela operação da máquina ferramenta.

8. REFERÊNCIAS

- ARDAKANI, M. K.; NOOROSSANA, R. A new optimization criterion for robust parameter design - The case of target is best. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 38, n. 9-10, p. 851–859, 2008a.
- BRITO, T. G.; PAIVA, A. P.; FERREIRA, J. R.; GOMES, J. H. F.; BALESTRASSI, P. P. A normal boundary intersection approach to multiresponse robust optimization of the surface roughness in end milling process with combined arrays. *Precision Engineering*, v. 38, n. 3, p. 628–638, 2014. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.02.013>>..
- DAS, I.; DENNIS, J. Normal-Boundary Intersection: An alternate method for generating pareto optimal points in multicriteria optimization problems. *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Optimization*, , n. 8, p. 631–657, 1998. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2060/19970005647>>..
- DENKANA, B.; BOEHNKE, D.; DEGE, J. H. Helical milling of CFRP–titanium layer compounds. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 1, n. 2, p. 64–69, 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755581708000394>>. Acesso em: 8/8/2014.
- LIN, D. K. J., & TU, W. (1995). Dual Response Surface Optimization. *Journal of Quality Technology* 27(1), 34-39.
- FANG, Q.; PAN, Z.; FEI, S.; XIE, X.; KE, Y. A Novel Helical Milling End-Effector and Its Application. , v. 20, n. 6, p. 3112–3122, 2015.
- LI, Z.; LIU, Q. Surface topography and roughness in hole-making by helical milling. , p. 1415–1425, 2013.
- MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. Ed. 5. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. Ed. 8. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- MOTTA, R. S. DE; AFONSO, S. M. B.; LYRA, P. R. M. A modified NBI and NC method for the solution of N-multiobjective optimization problems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 46, n. 2, p. 239–259, 2012.
- PAIVA, A. P. DE; GOMES, J. H. F.; PERUCHI, R. S.; LEME, R. C.; BALESTRASSI, P. P. A multivariate robust parameter optimization approach based on Principal Component Analysis with combined arrays. *Computers & Industrial Engineering*, v. 74, p. 186–198, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835214001715>>.
- SASAHARA, H.; KAWASAKI, M.; TSUTSUMI, M. Helical Feed Milling with MQL for Boring of Aluminum Alloy. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, v. 2, n. 6, p. 1030–1040, 2008. Disponível em: <<http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/jamdsm/2.1030?from=CrossRef>>. Acesso em: 24/6/2014.
- SHIN, S.; SAMANLIOGLU, F.; CHO, B. R.; WIECEK, M. M. Computing trade-offs in robust design: Perspectives of the mean squared error. *Computers and Industrial Engineering*, v. 60, n. 2, p. 248–255, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2010.11.006>>.
- TANG, L. C.; XU, K. Response Surface Optimization. *October*, v. 34, n. 4, p. 437–447, 2002.
- TONSHOFF, H. K. I.; KONIG, I.; NEISES, A.; AACHEN, R. Keynote Papers presented in the Scientific Technical

Committees Machining of Holes Developments in Drilling Technology. , v. 43, p. 551–561, 1994.

WANG, H.; QIN, X.; LI, H. Machinability analysis on helical milling of carbon fiber reinforced polymer. , v. 9, n. 5, p. 1–11, 2015.

YICAI, S.; NING, H. E.; LIANG, L. I.; XIAOJIE, Q. I. N.; WEI, Z. Orbital Milling Hole of Aerospace Al-Alloy with Big Pitch *. , , n. 50975141, p. 329–335, 2011.

ZHAO, Q.; QIN, X.; JI, C.; LI, Y. Tool life and hole surface integrity studies for hole-making of Ti6Al4V alloy. , p. 1017–1026, 2015.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ROBUST OPTIMIZATION BASED ON NORMAL BOUNDARY INTERSECTION METHOD OF MATERIAL REMOVAL RATE AND ROUNDNESS IN HELICAL MILLING PROCESS

Abstract. *The helical milling process has presented itself as an alternative to conventional drilling process for holemaking once it allows holes with better quality shape, lower energy consumption, reduction of setups, among other advantages. Considering the trade-off between quality and productivity, this study presents the modelling and multiobjective optimization of removal material rate MRR [cm³/min], a productivity variable, and total roundness Ron_t [μm], a quality variable, been the first one a deterministic response and the second one a probabilistic response in helical milling process of Al7075. It was used a central composed design, considering control and noise parameters, in order to model the mean and variance functions of Ron_t response and optimize the process to make it robust to the analysed noise factor variation. The material removal rate variable was just described in terms of specific process parameters. Normal boundary intersection and mean square error methods were used to obtain an arrangement of Pareto optimal solutions to the nonlinear biobjective optimization of evaluated responses. The tool length in balance was the noise factor considered once it does not depends on the experimenter choice, but it depends on the geometry being machined. By means of proposed methodology the MRR and Ron_t responses were optimized became robust to noise variable variation.*

Keywords: *Helical Milling; Total Roundness, Material Removal Rate, Robust Parameter Design; Normal Boundary Intersection Method.*