

MÉTODO DA INTERSEÇÃO NORMAL À FRONTEIRA PARA OTIMIZAÇÃO BI-OBJETIVO NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL 410

Guilherme Augusto Vilas Boas Vasconcelos

Matheus Brendon Francisco

IEM-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. Av. BPS. 1303 CEP:37500-903

e-mails guilhermevasconcelos01@yahoo.com.br; matheus_brendon@yahoo.com.br;

Carlos Henrique de Oliveira

IEI-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. Campus avançado de Itabira. Rua irmã Ivone Drummond; nº 200. CEP: 35903-087.

Itabira-MG

e-mail carlos.henrique@unifei.edu.br;

Resumo. Os aços inoxidáveis, devido à excelente combinação de propriedades como alta resistência mecânica e alta resistência à corrosão, são aplicados em indústrias alimentícias, eletrodomésticas, petroquímicas, etc. Esses materiais apresentam baixa condutividade térmica, alta tenacidade e taxa de encruamento, o que os tornam difíceis de serem usinados. Neste sentido, estudos estatísticos vêm sendo aplicados para estabelecer os pontos ótimos, visando melhorar o desempenho do processo garantindo redução de tempo e melhoria na qualidade final. Este estudo teve como objetivo realizar uma otimização bi-objetiva no processo de torneamento do aço inoxidável martensítico 410 e construir a fronteira de Pareto com os pontos ótimos utilizando o método da interseção normal a fronteira (NBI – Normal Boundary Intersection). As variáveis selecionadas foram a velocidade de corte (150-300 m/min), o avanço (0,1-0,3 mm/rot), a profundidade de corte (0,5-1 mm) e sem a utilização de fluido de corte. Os resultados mostram que foi possível gerar a fronteira de Pareto de forma equidistante e equiespaçada, de acordo com a proposta do método NBI. A ANOVA evidenciou que a variável que exerceu maior influência em R_a foi o avanço, enquanto para a MRR foram a profundidade de corte (ap), avanço (fn) e velocidade (vc), nesta ordem, respectivamente.

Palavras-chave: Aço inoxidável 410. Torneamento. Método da Interseção Normal a Fronteira (NBI). Metodologia de Superfície de Resposta (MSR).

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis martensíticos apresentam em sua liga, estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), constituídas essencialmente de Fe-Cr, contendo entre 11,5 e 18,0% de Cr e entre 0,1 e 0,5% de C, facilmente endurecíveis por tratamento térmico (GAMARRA; DINIZ, 2018). Devido à adição de carbono, pode ser endurecido e a sua resistência aumentada pelo tratamento térmico e são classificados como uma família ferro magnético “dura” (MATHEW; VARMA P.R; KURIAN P, 2014). A principal característica dos aços inoxidáveis martensíticos são a elevada resistência à corrosão em ambientes agressivos (água do mar, soluções ácidas e básicas, ambientes industriais), outras características são a resistência à oxidação em altas temperaturas e a resistência à corrosão química. Assim, os campos principais de aplicação são: na indústria química, petrolífera e de gêneros alimentícios; nos setores farmacêutico, biomédico, de transporte; das estruturas *off-shore*; de eletrodomésticos, da construção civil e do mobiliário urbano (BONIARDI; CASAROLI, 2014).

Com a crescente demanda da indústria de exploração de petróleo e gás por materiais de excelente desempenho em ambientes corrosivos, novas soluções vêm sendo exigidas do mercado atual (GAMARRA; DINIZ, 2018). O aumento no consumo e na produção do aço inoxidável reforçou ainda mais novos desenvolvimentos nas indústrias de ferramenta de corte. Devido ao complexo processo de manufatura de peças usinadas, fabricantes de ferramentas investiram tempo e recursos para encontrar novos meios de enfrentar os desafios desta aplicação (PAYLING, 2016). Payling (2016) reforça que, segundo a (*International Stainless Steel Fórum - ISSF*), a demanda global de produtos de aço inoxidável dobrou nos últimos 20 anos e que em 2014, quase 42 milhões de toneladas de aço inoxidável foram produzidas no mundo, um aumento de 70% desde 2005 (24 milhões de toneladas).

A complexidade na usinagem dos aços inoxidáveis martensítico, ocorre devido à baixa usinabilidade e pela presença de martensita e carbonetos de cromo (partículas duras e abrasivas). Os aços inoxidáveis apresentam características de usinagem que variam para cada tipo. Os martensíticos, por apresentarem maior teor de carbono, tendem a formar partículas duras de carboneto de cromo (Cr_3C_2), o que gera abrasividade, aumentando o desgaste da ferramenta; quando tratados termicamente, apresentam alta dureza, exigindo maior esforço no corte do material (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Afim de reduzir e/ou minimizar essa complexidade, empresas de manufatura vem aplicando em seus processos, ferramentas estatísticas para determinar os pontos ótimos durante a usinagem do aço inoxidável, com o objetivo de aumentar a produtividade e reduzir os desperdícios com valores não agregados (AIRAO et al., 2018). O planejamento de

Experimentos (PE) vem sendo aplicado para resolução desse problema, segundo Montgomery (2013), o PE consiste em delinear os experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma análise estatística eficaz, o que resulta em conclusões válidas e objetivas. De modo geral, a relação entre às variáveis de um processo de usinagem nem sempre são conhecidas, por isso, muitas empresas complementam o PE aplicando o conceito de Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), pois essa metodologia de modo análogo, consegue estabelecer equações polinomiais de segunda ordem, para identificar as relações existentes entre as variáveis dependentes e independentes (PARA et al., 2015).

A otimização de problemas com múltiplos objetivos consiste em obter uma solução ótima com vários termos sujeitos a um conjunto de restrições (LOPES, 2016). As somas ponderadas são amplamente utilizadas para gerar soluções em problemas multiobjetivos atribuindo pesos aos parâmetros e formando, assim, um conjunto de soluções viáveis e não dominadas, conhecido como fronteira de Pareto (GOVINDALURI & CHO, 2007; SHIN et al., 2011; BRITO et al., 2016). No entanto, segundo Vahidinasab & Jadid (2010), o método de somas ponderadas apresenta algumas desvantagens, como: a variação sistemática dos pesos não garante uma boa diversidade do conjunto de soluções e se o conjunto de soluções de Pareto não for convexo, a fronteira de Pareto passa a ser não convexa e descontínua, formando clusters de soluções Pareto-ótimas em regiões de grande curvatura, porém, descontínuas no espaço de solução, típico de problemas mal condicionados. Desta forma, para contornar as desvantagens inerentes ao método das somas ponderadas, Das e Denis (1998) propuseram o método da interseção normal à fronteira (NBI - *Normal Boundary Intersection*), mostrando ser possível a construção de fronteiras de Pareto contínuas e uniformemente distribuídas, independentemente da distribuição de pesos ou das escalas relativas entre as diferentes funções objetivo. Este método é capaz de gerar fronteiras convexas com soluções equidistantes ou determinar pontos ótimos viáveis em regiões não convexas da fronteira, onde sua construção é feita por meio da matriz *Payoff*, que é composta pelos pontos de utopia e os pontos de nadir. Portanto, esta pesquisa tem como objetivo realizar uma otimização bi-objetivo no processo de torneamento do aço inoxidável martensítico 410 e construir uma fronteira de Pareto utilizando o método NBI.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos foi utilizado o torno CNC de marca Romi®, com 15 kW de potência e rotação máxima de 4000 rpm. Para os ensaios utilizou-se um inserto de metal duro com código YBG205 e identificação TNMG-160404, classe ISO M25, para cada condição ensaiada, foi utilizada uma aresta de corte nova. O suporte foi o MTJNR 2525 M16 com fixação por grampo e parafuso e $K_r = 95^\circ$. O material usinado foi o aço inoxidável martensítico 410, com dimensões de 50 mm x Ø 44,45 mm com dureza média de 200 HB, sua composição química pode ser vista na “Tab. 1”.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável 410 (IMOA, 2012)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N2
0,08	1,00	1,00	0,040	0,03	12,5	3,14	-	0,1

Para a coleta e modelagem dos dados, foi utilizado um planejamento de experimentos com arranjo composto central (CCD – Central Composite Design). Para Box e Drapper (1987) e Montgomery (2005), Montgomery (2013) e Myers et al. (2016), o arranjo composto central (CCD), é amplamente empregado para ajustar um modelo de superfície de resposta de segunda ordem devido à sua eficiência com respeito ao número de experimentos necessários. O arranjo composto central (CCD) é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo (2^k , sendo k o número de variáveis) ou um arranjo fatorial fracionado (2^{k-p} , sendo p a fração desejada do experimento); um conjunto de pontos centrais (*Center Points*) (m) e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados pontos axiais ($2k$). Montgomery (2013) ressalta que, em regra, um arranjo composto central (CCD) com k fatores requer 2^k corridas fatoriais, $2k$ corridas axiais e três a cinco pontos centrais, conforme recomendado pela literatura. Neste trabalho foram escolhidos 3 fatores, 2 níveis e 6 pontos centrais, totalizando 20 experimentos, sendo 8 pontos fatoriais (2^3), 6 pontos axiais (2×3) e 6 pontos centrais ($m=6$). Os níveis dos parâmetros de corte encontram-se na “Tab. 2”.

Tabela 2. Níveis dos parâmetros utilizados no torneamento do aço inoxidável Martensítico 410 (Autoria Própria)

Parâmetros	-1	+1
Velocidade de corte (vc) [m/min]	150	300
Avanço (fn) [mm/rot]	0,1	0,3
Profundidade de corte (ap) [mm]	0,5	1,0
Fluído de Corte	Sem	

Após a realização de todos os experimentos, a medição de rugosidade seguiu a norma 4287/2002 para determinação do *Cut-off*. Como o processo de torneamento é um processo periódico, o comprimento dos sulcos foi considerado igual ao avanço f_n utilizado durante a usinagem do material. O valor adotado para l_e foi de 0,8, onde l_e é o mínimo comprimento

de amostragem. A rugosidade R_a foi mensurada com o auxílio do rugosímetro portátil da marca Taylor Hobson em três pontos equidistantes a 120° e perpendicular ao sulco de usinagem, considerando o valor médio das leituras. A taxa de remoção de cavaco MRR foi calculada conforme “Eq. (1)”. A matriz experimental utilizada para a execução dos experimentos encontra-se na “Tab. 3”.

$$MRR = \frac{(p_i - p_f)}{\rho \times t_c} \quad (1)$$

Onde:

p_i é o peso inicial da peça em gramas.

p_f é peso final da peça em gramas.

ρ é a densidade do material em $\frac{g}{cm^3}$

t_c tempo de corte (s). O tempo de usinagem foi utilizado somente como uma variável para calcular a taxa de remoção de cavaco, não sendo considerada para avaliar o desempenho do processo.

Tabela 3. Matriz experimental e valores de rugosidade R_a e MRR para o torneamento do aço inoxidável martensítico 410 (Autoria Própria)

OrdemEns	TipoPt	Blocos	v_c [m/min]	f_n [mm/rot]	a_p [mm]	R_a [μm]	MRR [cm^3/s]
1	1	1	150,000	0,100	0,500	0,80	73,448
2	1	1	300,000	0,100	0,500	1,13	110,173
3	1	1	150,000	0,300	0,500	7,87	140,220
4	1	1	300,000	0,300	0,500	7,26	199,943
5	1	1	150,000	0,100	1,000	1,00	151,905
6	1	1	300,000	0,100	1,000	1,07	222,793
7	1	1	150,000	0,300	1,000	7,93	303,809
8	1	1	300,000	0,300	1,000	7,83	371,322
9	-1	1	98,866	0,200	0,750	3,47	151,217
10	-1	1	351,134	0,200	0,750	3,60	269,923
11	-1	1	225,000	0,032	0,750	1,00	62,619
12	-1	1	225,000	0,368	0,750	11,69	299,914
13	-1	1	225,000	0,200	0,330	3,40	116,850
14	-1	1	225,000	0,200	1,170	3,73	350,549
15	0	1	225,000	0,200	0,750	3,73	233,699
16	0	1	225,000	0,200	0,750	3,60	222,014
17	0	1	225,000	0,200	0,750	3,73	222,014
18	0	1	225,000	0,200	0,750	3,60	233,699
19	0	1	225,000	0,200	0,750	3,60	233,699
20	0	1	225,000	0,200	0,750	3,33	233,699

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Modelo Matemático

A partir dos resultados experimentais foi possível estabelecer as relações matemáticas entre as respostas e os parâmetros do processo. O modelo de superfície de resposta de segunda ordem e a ANOVA foram utilizados para representar as relações aproximadas entre as respostas de interesse e as variáveis do processo. Estimou-se os coeficientes dos modelos utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS – *Ordinary Least Square*), por meio do software estatístico MINITAB®. O valor-P determina a significância dos coeficientes encontrados no MINITAB®. Quanto menor o valor-P, mais significativa é a variável no processo. Assumimos valor-P $\leq 0,5$. Se o valor-P for abaixo desse valor, a variável tem maior significância (Montgomery, 2013). A “Tabela 4” apresenta os coeficientes para os modelos quadráticos completos para a resposta R_a . Pode ser observado que o avanço e seu termo quadrático foram significativos para a variação da resposta.

Tabela 4. Coeficientes estimados para o modelo quadrático completo de R_a .

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P
Constante	3,6056	0,0826	43,67	0,000
v_c	-0,0060	0,0548	-0,11	0,914
f_n	3,2852	0,0548	59,97	0,000
a_p	0,0977	0,0548	1,78	0,105
$v_c * v_c$	-0,0601	0,0533	-1,13	0,286
$f_n * f_n$	0,9334	0,0533	17,50	0,000
$a_p * a_p$	-0,0483	0,0533	-0,91	0,387
$v_c * f_n$	-0,1383	0,0716	-1,93	0,082
$v_c * a_p$	0,0300	0,0716	0,42	0,684
$f_n * a_p$	0,0633	0,0716	0,88	0,397

A “Tabela 5” apresenta os coeficientes para os modelos quadráticos completos desenvolvidos para a resposta MRR. Os fatores que causaram variação significativa para a resposta foram a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de corte, os termos quadráticos de v_c e f_n e a interação entre o avanço e a profundidade de corte.

Tabela 5. Coeficientes estimados para o modelo quadrático completo de MRR

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P
Constante	230,14	4,80	47,99	0,000
v_c	31,81	3,18	10,00	0,000
f_n	62,68	3,18	19,70	0,000
a_p	67,30	3,18	21,15	0,000
$v_c * v_c$	-9,02	3,10	-2,91	0,016
$f_n * f_n$	-19,38	3,10	-6,26	0,000
$a_p * a_p$	-0,84	3,10	-0,27	0,791
$v_c * f_n$	2,45	4,16	0,59	0,568
$v_c * a_p$	5,24	4,16	1,26	0,236
$f_n * a_p$	17,99	4,16	4,33	0,001

O modelo matemático de R_a e MRR são apresentados nas equações “Eq. (2)” e “Eq. (3)”, respectivamente. As “Tabelas 6 e 7”, mostram os ajustes dos modelos. Ambos apresentaram ajustes relevantes. A rugosidade R_a apresentou $R^2(\text{aju})$ de 99,52 % e a taxa de remoção de cavaco MRR um $R^2(\text{aju})$ de 98,12 %. Com esses resultados, pode-se afirmar que os modelos conseguem explicar uma quantidade significativa dos dados do processo. Apesar do avanço por dente ser a única variável significativa para R_a , optou-se por utilizar o modelo matemático completo em função de sua alta capacidade de previsão, conforme o seu $R^2(\text{aju})$.

$$Ra = 3,6056 - 0,0060 v_c + 3,2852 f_n + 0,0977 a_p - 0,0601 v_c^2 + 0,93334 f_n^2 - 0,0483 a_p^2 - 0,1383 v_c * f_n + 0,0300 v_c * a_p + 0,0633 f_n * a_p \quad (2)$$

$$MRR = 230,14 + 31,81 v_c + 62,68 f_n + 67,30 a_p - 9,02 v_c^2 - 19,38 f_n^2 - 0,84 a_p^2 - 2,45 v_c * f_n + 5,24 v_c * a_p + 17,99 f_n * a_p \quad (3)$$

Tabela 6. Resumo dos parâmetros encontrados para o modelo de R_a gerado via planejamento de experimentos.

S	R^2	$R^2(\text{aju})$	$R^2(\text{pred})$
0,202449	99,75%	99,52%	98,41%

Tabela 7. Resumo dos parâmetros encontrados para o modelo de MRR gerado via planejamento de experimentos.

S	R^2	$R^2(\text{aju})$	$R^2(\text{pred})$
11,7575	99,01%	98,12%	93,20%

3.2. Análise dos efeitos principais

O gráfico dos efeitos principais representa a influência dos fatores controláveis nas variáveis de resposta. Na “Fig. 1” (a) é possível verificar que a rugosidade R_a é minimizada ao utilizar a velocidade no nível +1 (300 m/min), o avanço no -1 (0,10 mm/rot), a profundidade de corte no -1 (0,5 mm), entretanto, o avanço foi a variável que mais influenciou na resposta do processo.

Na “Figura 1” (b) é possível verificar que a taxa de remoção de cavaco é maximizada quando a velocidade de corte está no nível +1 (300 m/min), o avanço no +1 (0,3 mm/rot), a profundidade de corte no +1 (1,00 mm), no entanto, a profundidade de corte foi a variável que mais influenciou na resposta do processo, seguido do avanço e da velocidade de corte.

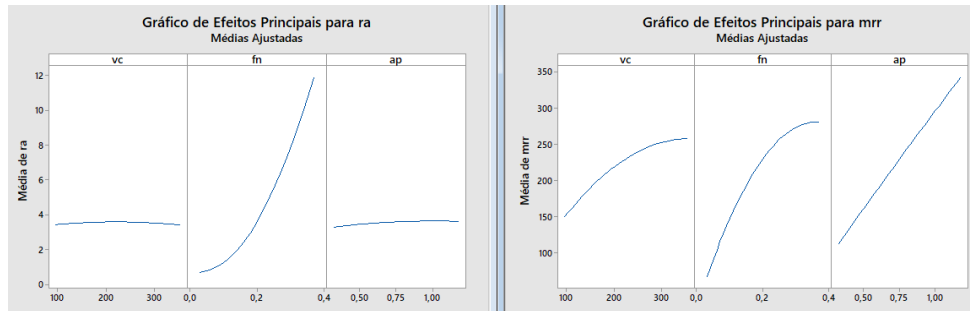


Figura 1 (a). Gráfico dos efeitos principais para a R_a (Autoria Própria)

Figura 1 (b). Gráfico dos efeitos principais para a MRR (Autoria Própria)

Outra maneira eficiente de analisar os efeitos dos fatores nas respostas analisadas, são por meio da superfície de resposta. Segundo Montgomery (2009), Paiva (2014) e Brito (2015) a superfície de resposta é uma metodologia composta por técnicas matemáticas e estatísticas aplicadas na análise e modelagem de respostas influenciadas por diversas variáveis. Na “Fig. 2” são apresentados os gráficos de contorno para as superfícies de resposta R_a . Nas Figs.2 (a) e (b) nota-se que menores valores de rugosidade R_a são observados quando o avanço (f_n) é menor ou igual 0,15 mm independentemente dos valores utilizados para a velocidade (v_c) e profundidade de corte (a_p). Portanto, o avanço é o parâmetro mais influente na rugosidade da superfície e está de acordo com a literatura acerca do tema em questão. Segundo Machado (2009) a rugosidade da superfície é diretamente proporcional ao quadrado do avanço e inverso o raio da ponta da ferramenta. Assim, quanto maior o avanço maior será a altura dos picos e vales, provocando um aumento da rugosidade da superfície

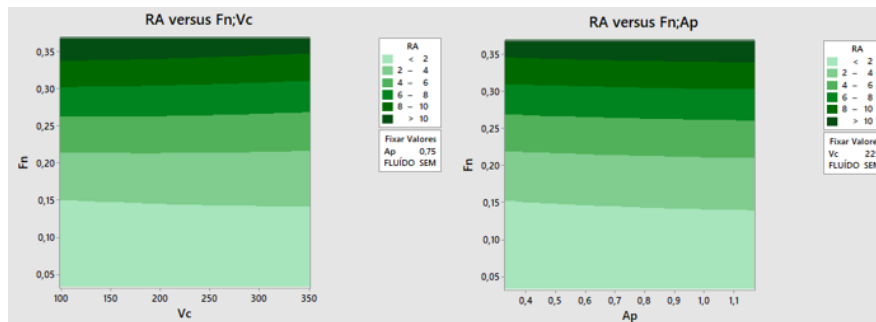


Figura 2. Gráfico de Contorno para R_a

A “Figura 3” apresenta os gráficos de contorno para as superfícies de resposta da taxa de remoção de cavaco (MRR). Nota-se nas “Figs. 3” (a), (b) e (c) que maiores valores de MRR são observadas quando os parâmetros de corte se encontram em seu maior nível (+1). Portanto, de acordo com o gráfico de contorno gerado, pode-se depreender que quanto maior for as variáveis de controle do processo, maior será a taxa de remoção de material, e isso pode ser explicado pela formulação teórica amplamente discutida na literatura de usinagem, conforme “Eq. 4”, ou seja, a_p , f_n e v_c são diretamente proporcionais à MRR.

$$Q = a_p \times f_n \times v_c \text{ (cm}^3\text{/min)}$$

(4)

onde:

a_p = Profundidade de corte (mm);

f_n = Avanço (mm/rot);

v_c = Velocidade de corte (mm/min).

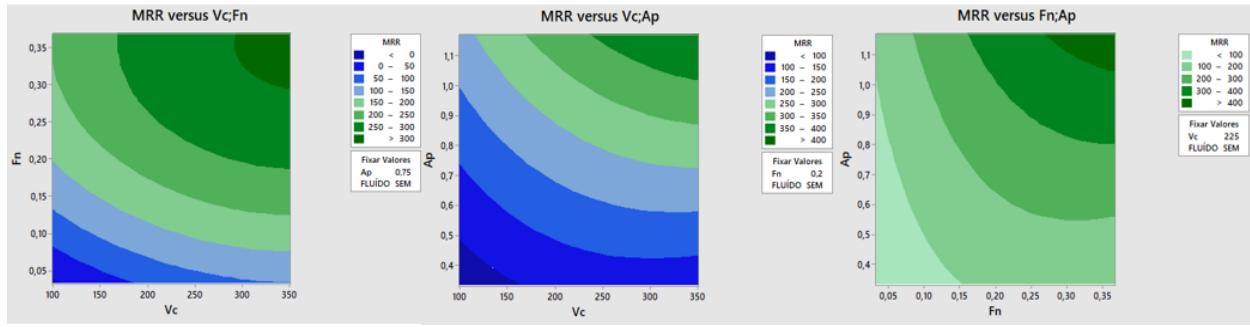


Figura 3. Gráfico de Contorno para MRR

3.3. Otimização das Respostas Ra e MRR

O objetivo desta pesquisa é realizar a otimização das funções R_a e MRR, conforme os modelos matemáticos, para construir a fronteira de Pareto com os pontos ótimos do processo. Seguindo as etapas do método NBI, o primeiro passo é calcular os elementos da matriz Payoff Φ , que representa os valores ótimos das múltiplas funções objetivo de modo individual. O vetor de solução que minimiza ou maximiza individualmente a i -ésima função objetivo $f_i(x)$ é representado por x_i^* , de tal maneira que $f_i(x)$ neste ponto seja $f_i^*(x_i^*)$. Quando se substitui o ponto de ótimo individual x_i^* nas demais funções, tem-se que $f_i(x_i^*)$ é um valor não-ótimo. Repetindo-se este algoritmo para as demais funções, constrói-se a matriz *Payoff* conforme “Eq. 5”. (JIA e IERAPETRITOU, 2007; UTYUZHNIKOV et al., 2009).

$$\Phi = \begin{bmatrix} f_1^*(x_1^*) & \cdots & f_1(x_i^*) & \cdots & f_1(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_i(x_1^*) & \cdots & f_i^*(x_i^*) & \cdots & f_i^*(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_m(x_1^*) & \cdots & f_m(x_i^*) & \cdots & f_m^*(x_m^*) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Cada linha de Φ é composta valores mínimos e máximos de $f_i(x)$. No método NBI, estes valores podem ser usados para normalizar as funções objetivo, principalmente quando as mesmas são representadas por escalas ou unidades diferentes (BRITO et al.; 2014). Escrevendo o conjunto de ótimos individuais em um vetor, tem-se $f^U = [f_1^*(x_1^*), \dots, f_i^*(x_i^*), \dots, f_m^*(x_m^*)]^T$. Este vetor é denominado Ponto de Utopia. Do mesmo modo, agrupando-se os valores máximos (não-ótimos) de cada função objetivo, tem-se o vetor $f^N = [f_1^N, \dots, f_i^N, \dots, f_m^N]^T$ denominado de Pontos Nadir (BRITO et al.; 2015). Para o presente trabalho, a matriz *payoff* pode ser simplificada conforme “Eq. 6” e os valores calculados, por meio da minimização de R_a e maximização de MRR, encontram-se na “Tab. 8”. Os valores em negrito representam os pontos de utopia e os demais elementos são os de Nadir.

$$\Phi = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_1^*(x_1^*) & f_1^*(x_2^*) \\ f_2^*(x_1^*) & \mathbf{f}_2^*(x_2^*) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Tabela 8. Matriz *Payoff*

0,544	7,111
56,269	406,227

Estabelecida a matriz Payoff, o próximo passo é realizar a normalização das funções objetivo conforme “Eq. 7”.

$$\bar{f}(x) = \frac{f_i(x) - f_i^U}{f_i^N - f_i^U} \quad (7)$$

Após a normalização das funções objetivo foi possível realizar as otimizações. O método de otimização utilizado neste trabalho foi o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) disponível no aplicativo Solver do software Microsoft Excel®. Este algoritmo de otimização é considerado robusto e eficiente. A “Equação 8” foi aplicada para gerar a fronteira de Pareto, de acordo com a “Fig. 4”, por meio das alterações do peso (w) com incrementos de 0,05 variando-os entre 0 e 1.

$$\begin{aligned} & \text{Min } \bar{f}_1(x) \\ & \text{s.t.: } \bar{f}_1(x) - \bar{f}_2(x) + 2w - 1 = 0 \\ & g_j(x) \geq 0 \\ & 0 \leq w \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$



Figura 4. Fronteira de Pareto $R_a \times \text{MRR}$

Conforme a “Fig. 4”, o método NBI foi capaz de gerar uma fronteira de Pareto equiespaçada, de acordo com a proposta feita por Das e Denis (1998). Nesta pesquisa foram gerados 21 pontos ótimos em função da variação dos pesos w , de forma interativa. No ponto em destaque (na “Fig. 4”), as variáveis de controle assumem os seguintes valores: $v_c = 225 \text{ m/min}$, $f_n = 0,06 \text{ mm/rot}$ e $a_p = 0,99 \text{ mm}$. Substituindo esses valores nos modelos matemáticos é possível obter uma rugosidade R_a de $0,5 \text{ }\mu\text{m}$ e uma taxa de remoção de cavaco de $56,269 \text{ cm}^3/\text{min}$. As respostas analisadas apresentam sentidos opostos de otimização, neste caso o que se busca na prática é minimizar a rugosidade R_a (qualidade) e ao mesmo maximizar MRR (produtividade), portanto este método permite que as indústrias de manufatura possam escolher os seus pontos ótimos baseados nos seus critérios de qualidade e/ou produtividade, de acordo com suas estratégias operacionais.

4. CONCLUSÕES

A utilização da metodologia de superfície de resposta permitiu estabelecer os modelos matemáticos que relacionam às variáveis de controle e de respostas durante o torneamento do aço inoxidável 410. Os modelos apresentados mostraram ajustes significativos. A rugosidade R_a apresentou um $R^2(\text{aju})$ de 99,68 % e a taxa de remoção de cavaco MRR um $R^2(\text{aju})$ de 97,68%, o que significa que a variação das respostas é explicada pelos modelos matemáticos utilizando os dados coletados do processo. Em relação à rugosidade R_a , foi possível concluir que o fator mais influente foi o avanço (f_n), o que pode ser explicado devido à relação direta e proporcional desse parâmetro na qualidade da superfície da peça usinada, ou seja, quanto maior for o avanço, maior será a altura dos picos e vales, ocasionando um aumento na rugosidade da superfície. Para a MRR, o fator predominante foi a profundidade de corte (a_p) seguido do avanço (f_n) e da velocidade de corte (v_c), confirmando o que a literatura fala sobre a MRR, que os três fatores são diretamente proporcionais a taxa de remoção de cavaco. A otimização bi-objetiva realizada utilizando o método NBI permitiu gerar a fronteira de Pareto de forma equiespaçada, o que confirma a proposição feita por Das e Denis (1998). Em função da variação dos pesos w , de forma interativa, foi possível gerar 21 pontos ótimos e que permite ao tomador de decisão escolher o melhor deles de acordo com seus critérios e necessidades.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro das seguintes agências de fomento brasileiras: CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais). Os autores também gostariam de agradecer a empresa RCS Usinagem de Manutenção e Precisão Eireli pelo apoio na realização dos experimentos.

6. REFERÊNCIAS

- AIRAO, J. et al. An Experimental Study of Surface Roughness Variation in End Milling of Super Duplex 2507 Stainless Steel. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 2, p. 3682–3689, 2018.
- BONIARDI, M.; CASAROLI, A. *Stainless Steel*. [s.l.: s.n.]. 2014
- BOX, G. E. P., DRAPER, N. R. *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. John Wiley e Sons, 1ª ed., 650 p, 1987.
- 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, p. 628-638, 2014.
- BRITO, T. G.; PAIVA, A. P.; FERREIRA, PAULA, T. I.; DALOSTO, D. N.; BALESTRASSI, P.P. Optimization of AISI 1045 end milling using robust parameter design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015.
- DAS, I; DENNIS, J. E. Normal boundary intersection: A new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. *SIAM Journal of Optimization*, v.8, p. 631-657, 1998.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da Usinagem*. Tecnologia da Usinagem, v. 8, 2014.
- GAMARRA, J. R.; DINIZ, A. E. Taper turning of super duplex stainless steel: tool life, tool wear and workpiece surface roughness. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, n. 1, p. 1–13, 2018.

- GOVINDALURI, S. M.; CHO, B. R. Robust design modeling with correlated quality characteristics using a multicriteria decision framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, n. 5-6, 2007. 423-433.
- IMOA. Orientações práticas para processamento dos aços inoxidáveis Duplex. International Molybdenum Association, Londres, UK, n. 2ª, 2012. ISSN ISBN 978-1-907470-07-3.
- JIA, Z.; IERAPETRITOU, G. Generate Pareto optimal solutions of scheduling problems using normal boundary intersection technique. *Computers and Chemical Engineering*, v. 31, p.268-280, 2007.
- LOPES, L. G. D.; BRITO, T. G.; PAIVA, A. P.; PERUCHI, R. S.; BALESTRASSI, P. P. Robust parameter optimization based on multivariate normal boundary intersection. *Computers & Industrial Engineering*, 93, 2016. 55-66.
- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 371 p.
- MATHEW, S.; VARMA P.R, D.; KURIAN P, S. Study on the Influence of Process Parameters on Surface Roughness and MRR of AISI 420 Stainless Steel Machined by EDM. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, v. 15, n. 2, p. 54–58, 2014.
- MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 7 ed. New York: John Wiley & Sons, p. 665, 2009.
- MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 8ª ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. 752 p.
- PARA, F. et al. Análise da utilização do método da interseção normal à fronteira para otimização de respostas multicorrelacionadas. n. October, 2015.
- PAIVA, A. P.; 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.
- PAYLING, R. Considerações sobre a usinagem de aços inoxidáveis - Usinagem Brasil, 2016. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/10562-consideracoes-sobre-a-usinagem-de-acos-inoxidaveis/pa-2/>>
- POLICENA, M. R. et al. Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 98, n. 5–8, p. 1617–1625, 2018.
- SHIN, S.; SAMANLIOGLU, F.; CHO, B. R.; WIECEK, M. M. Computing trade-offs in robust design: perspectives of the mean squared error. *Computers & Industrial Engineering*, 60, n. 2, 2011. 248-255.
- VAHIDINASAB, V.; JADID, S. Normal boundary intersection method for suppliers' strategic bidding in electricity markets: An environmental/economic approach. *Energy Conversion and Management*, 51, n. 6, 2010. 1111-1119.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

NORMAL FRONTIER INTERSECTION METHOD FOR BIOBJECTIVE OPTIMIZATION IN STAINLESS STEEL TURNING 410

Guilherme Augusto Vilas Boas Vasconcelos

Matheus Brendon Francisco

IEM-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. Av. BPS. 1303 CEP:37500-903

e-mails guilhermevasconcelos01@yahoo.com.br; matheus_brendon@yahoo.com.br;

Carlos Henrique de Oliveira

IEI-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. Campus avançado de Itabira. Rua irmã Ivone Drummond; nº 200. CEP: 35903-087. Itabira-MG

e-mail carlos.henrique@unifei.edu.br;

Abstract. Stainless steel has been gaining market share due to the excellent combination of properties such as high mechanical and corrosion resistance. These materials present great challenges for machining due to their low machinability. In this sense, statistical studies have been applied to establish the optimum points to improve the process, ensuring time reduction and improvement in the final quality. This study aimed to perform a bi-objective optimization in the process of turning martensitic stainless steel 410 and to build the Pareto boundary with the optimal points through the normal boundary intersection (NBI). The variables used were cutting speed (150-300 m / min), feed (0.1-0.3 mm / rot), depth of cut (0.5-1 mm) and without the presence of cutting fluid. The results show that the surface roughness Ra is mainly affected by the feed (fn) and the chip removal rate MRR the factor that most influences is the depth of cut (ap), followed by the feed (fn) and the cutting speed.

Keywords: 410 Stainless Steel; Turning; Normal Border Intersection Method; Response Surface Methodology

RESPONSIBILITY NOTICE

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