

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RUGOSIDADE, DAS FORÇAS DE USINAGEM E DOS DESVIOS GEOMÉTRICOS EM FUROS OBTIDOS POR FRESAMENTO HELICOIDAL NO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32760

José Veríssimo Ribeiro de Toledo, verissimo@unifei.edu.br¹

João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1.303, 37.500-903 Itajubá, Minas Gerais, Brasil

Robson Bruno Dutra Pereira, robsondutra@ufsj.edu.br²

²Centro de Inovação em Modelagem e Otimização de Sistemas-CIMOS, Centro de Inovação em Sustentabilidade- CIMS, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil.

Resumo: Os aços inoxidáveis super duplex representam um avanço significativo na fabricação de materiais resistentes à corrosão por pites e elevada resistência mecânica, com aplicação em ambientes severos como indústria petroquímica e plataformas de óleo e gás, porém apresentam difícil usinabilidade, caracterizado pela associação de altas taxas de endurecimento e baixa condutividade térmica que podem afetar a qualidade da superfície usinada. A escolha do processo de fresamento helicoidal, vem obtendo resultados satisfatórios em alternativa ao processo convencional de furação pois, apresenta maior eficiência de processamento e menor custo comparado à perfuração convencional e permite a obtenção de furos de diâmetros diferentes com ajuste do diâmetro da trajetória helicoidal, resultando em altos níveis de qualidade da superfície, precisão e correção da qualidade dimensional. Devido a trajetória helicoidal realizada pela fresa, há a possibilidade de realização de operações de acabamento sem necessidade de troca de ferramentas, permitindo obtenção de furos acabados em uma única operação, eliminando posteriores operações de acabamento. Nesse artigo foi avaliado os efeitos dos parâmetros de corte nos esforços de corte, no acabamento superficial e nos desvios geométricos (circularidade e cilindridade) utilizando o processo de fresamento helicoidal em um aço inoxidável super duplex liga UNS S32760. Utilizou-se um planejamento composto central aliado à metodologia de superfície de resposta com a finalidade de modelagem e estimativa dos efeitos, combinado com as variáveis de controle e de ruído nas respostas de interesse. Os resultados mostraram que o avanço tangencial por dente e a velocidade de corte foram os fatores que mais influenciaram na rugosidade, circularidade e cilindridade dos furos usinados, apresentando robustez à variação da vazão do fluido para o avanço axial por dente no caso da circularidade e robustez para o desvio de cilindridade, obtendo valores abaixo de 15µm independente da variação do avanço axial por dente e de todos as variáveis de ruído.

Palavras-chave: Aço super duplex; Fresamento helicoidal; Forças de usinagem; Rugosidade; Erros de forma

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis super duplex constituem um grupo de materiais específicos com ampla gama de aplicações em indústrias química, alimentícia aeroespacial, águas profundas, energia, entre outras, onde a longa vida útil dos componentes é desejada. Estes aços são ligas com alta resistência à corrosão com aplicações crescentes na indústria petrolífera e de gás (Nilsson e Chai, 2011; Chail e Kangas, 2016; Gamara e Diniz, 2018; Policena *et al.*, 2018 e Tavares *et al.*, 2018). São utilizados principalmente em bombas centrífugas, válvulas reguladoras de fluxo, partes estruturais de plataformas de extração de petróleo, e outras (Chater, 2010). Considerando as necessidades de furos nos flanges para as fixações das bombas, válvulas, e peças estruturais, um dos principais desafios na fabricação destas peças em aço inoxidável super duplex, consistem na realização de operações de furação.

Estes materiais são de difícil usinabilidade que estão geralmente associada à sua alta resistência à corrosão por pites. As altas taxas de encruamento, comparáveis às dos aços inoxidáveis austeníticos, podem levar a formação instável de cavacos, maiores esforços de corte, vibrações e conseqüentemente, menor vida de ferramentas e acabamentos superficiais não adequados (Korkut *et al.*, 2004; Nomani *et al.*, 2017), acarretando a necessidade de estratégias especiais de usinagem para garantir o sucesso das operações.

A superfície gerada após o processo de usinagem apresenta naturalmente desvios geométricos nos quais a rugosidade superficial se enquadra na categoria de desvios micro geométricos. Ele é, na maioria dos casos, inevitável devido à influência da ferramenta de corte durante o processo de remoção do cavaco (Petropoulos *et al.*, 2010). A importância de avaliar a rugosidade dos furos está na sua influência direta na lubrificação, atrito, resistência a corrosão e a fadiga, entre outros (Pereira *et al.*, 2016). Outra categoria enquadrada, como desvios macro geométricos (Petropoulos *et al.*, 2010), os erros de forma ou desvios de circularidade/cilindridade podem dificultar a montagem de componentes (Pereira *et al.*, 2017). A circularidade no fresamento helicoidal foi avaliada por autores como Saadatbakhsh *et al.* (2017), Zhou *et al.*

(2017b) e Pereira *et al.* (2019). Também Olvera *et al.* (2012) e Pereira *et al.* (2019) evidenciam que sua cinemática permite a produção de superfícies de alta qualidade dispensando operações de acabamento adicionais como o mandrilamento ou alargamento.

No caso de furação e usinagem de cavidades, o processo de fresamento helicoidal traz as vantagens do fresamento em detrimento dos inconvenientes da furação. Este processo pode ser aplicado na fabricação de componentes de aço inoxidável super duplex para obter furos com melhor qualidade dimensional, geométrica e superficial.

O fresamento helicoidal é composto por três movimentos simultâneos. O movimento de rotação da fresa em seu próprio eixo, o deslocamento linear da fresa na direção axial e o movimento circular da mesa do centro de usinagem, resultando por fim, num movimento helicoidal.

As dificuldades gerais do processo de furação estão relacionadas com a velocidade de corte nula na ponta da ferramenta, resultando em extrusão em vez de corte nesta região de diâmetro zero. A cinemática composta pelo avanço axial com rotação da broca em corte contínuo implicam altas forças de avanço, baixa evacuação de cavacos, quebra de material na saída do furo, altas taxas de desgaste, baixa vida da ferramenta, e baixa produtividade do processo. especialmente na abertura de furos com alta relação profundidade/diâmetro, o resfriamento por lubrificação é difícil e a aplicação de lubrificação por quantidade mínima (MQL) e outras abordagens modernas não são eficientes. Por fim, a pequena área da seção transversal da ferramenta de corte resulta em baixa resistência à torção, trazendo o risco de quebra da ferramenta dentro de furos de peças quase acabadas (Iyer *et al.*, 2007; Abrão *et al.*, 2011).

Devido ao trajeto helicoidal e ao emprego de uma fresa de topo ao invés de uma broca, a fresamento helicoidal apresenta diversas vantagens quando comparada ao processo de furação convencional. No fresamento helicoidal pode ser utilizada a mesma fresa de topo para obtenção de furos de diâmetros distintos através do ajuste do diâmetro da hélice, possibilitando economia de estoque de ferramentas e diminuição dos tempos de *setup* (Wang *et al.*, 2020; Denkena *et al.*, 2008 e Shan *et al.*, 2011). Neste processo a remoção do material é realizada pelas arestas de corte frontal e periférica, de forma contínua e intermitente, respectivamente, enquanto na furação a broca realiza a remoção de corte contínua. Menores esforços de corte na direção axial são desenvolvidos no fresamento helicoidal, quando comparados à furação, devido ao trajeto helicoidal e à geometria da fresa de topo. A melhor facilidade de remoção de cavacos, resfriamento e lubrificação por técnicas como MQL e ar comprimido, que são viáveis devido à maior folga entre ferramenta-peça (Lawal *et al.*, 2012; Sadeghi *et al.*, 2009 e Saadatbakhsh *et al.*, 2017).

O fresamento helicoidal apresenta melhor precisão dimensional, geométrica e microgeométrica (Denkena *et al.*, 2008; Iyer *et al.*, 2007 e Brinksmeier *et al.*, 2008). A correção dos desvios dimensionais pode ser realizada através do ajuste do diâmetro da hélice. O desgaste da ferramenta pode ser monitorado, pois ele ocorre progressivamente, possibilitando a previsão da vida da ferramenta. É possível obter furos acabados em apenas uma operação de usinagem. O fresamento helicoidal tem sido aplicado na fabricação de furos de materiais difíceis de cortar, especialmente ligas de titânio, plástico reforçado com fibra de carbono e outros (Pereira *et al.*, 2017).

Neste trabalho foi avaliado os efeitos dos parâmetros de corte nos esforços de corte, no acabamento e nos desvios geométricos (circularidade e cilindridade), utilizando o processo de fresamento helicoidal para obtenção de furos no aço inoxidável super duplex UNS S32760.

2. METODOLOGIA

Os experimentos planejados foram realizados no laboratório de Manufatura e Automatização do Núcleo de Otimização e Tecnologia da Inovação do Instituto de Engenharia e Gestão da Produção (IEPG) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Os testes foram realizados em um centro de usinagem ROMI® D 600 com controle numérico GE FANUC Oi-MD. Foram usados quatro fresas de topo de metal duro Sandvik Coromant R215.H4-10050DAC07P 1620 Coromill plura para realizar os testes de fresamento helicoidal. Esta ferramenta tem 10 mm diâmetro, $z = 4$ dentes, ângulo de hélice de 50° , ângulo de ataque axial de 6° , e radial ângulo de ataque de -18° , classe ISO M com revestimento TiAlN depositado por PVD. A profundidade axial máxima de corte desta ferramenta é igual a 0,7 mm. Um suporte hidráulico CoroChuck 930, BT-40 da norma JIS B 6339/DIN ISO 7388-2, código 930- B40-S-12-085 foi utilizado. A figura 1 mostra a configuração experimental com o suporte, fresa, peça de trabalho, dinamômetro e fixações.

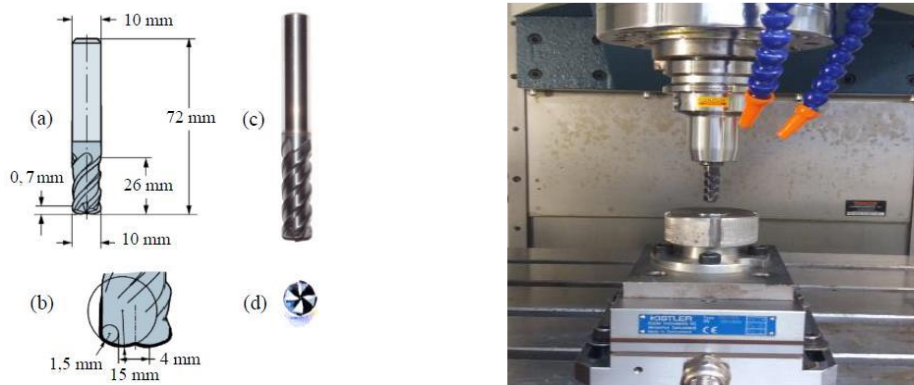


Figura 1. Setup experimental (a) dimensões; (b) detalhe duplo raio de ponta; (c) foto periferia; (d) foto frontal e Setup experimental.

As peças de aço inoxidável super duplex UNS S32760 foram anteriormente usinados de acordo com as dimensões representadas na Figura 2a. Este desenho foi concebido em conjunto com o dispositivo de fixação a ser acoplado no dinamômetro.

A Figura 2b mostra uma peça antes, e uma peça depois dos testes de fresamento helicoidal, com furo passante de 18mm de diâmetro.

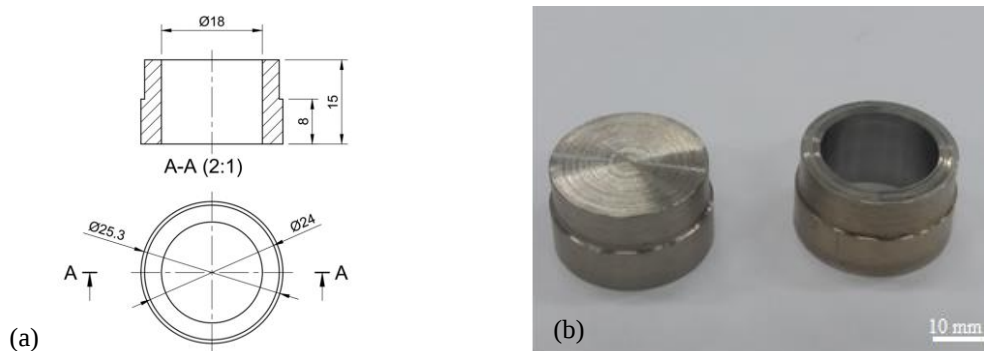


Figura 2. Fotos do: (a) desenho da peça e (b) corpo de prova e da peça usinada. Fonte: própria

O material foi fornecido pela Villares Metals com 26 HRC. A tabela 1 apresenta a composição química do material, conforme previsto e considerando a norma A790/A790M.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável Super duplex UNS S32760 (% peso). Fonte: adaptada (Chail e Kangas, 2016).

Aço	Qtd.	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Cu	N	PREN
UNS S32760	Min.	0,00	0,00	0,00	24,00	6,00	3,0	0,50	0,50	0,20	≥ 40
	Máx.	0,03	1,00	1,00	26,00	8,00	4,0	1,00	1,00	0,30	

Os componentes da força de usinagem foram medidos através de um dinamômetro piezoelétrico estacionário com três componentes modelo 9257BA com amplificador de sinal modelo 5233A, e software Dynoware ambos da Kistler. A aquisição a frequência foi de 500hz. Para a filtragem, foi considerado um filtro de baixa passagem Butterworth com ordem de filtro igual a 2 e frequência de corte igual a 0,01. Figura 3 mostra os sinais da força de corte. A Figura 3a mostra a força axial, F_a , considerando o sinal bruto e o filtrado. O comprimento do furo foi considerado como um fator de ruído no projeto experimental com três níveis, início (I), meio (M), e fim (F). A Figura 3b mostra a força axial F_a e as duas componentes horizontais, F_x e F_y , após a filtragem considerando 10 segundos do experimento.

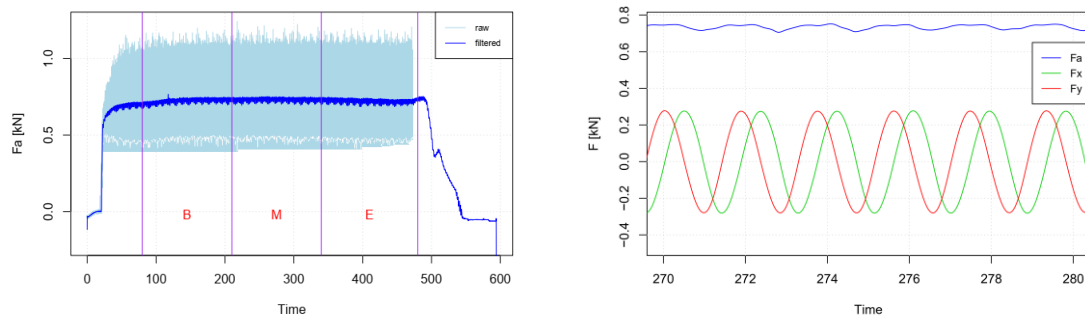


Figura 3. Processo de filtragem das forças: a) F_a filtrado e posições de lb b) forças filtradas

As medições de rugosidade foram realizadas utilizando um rugosímetro Mitutoyo SJ210, sendo considerado um *cut-off* de 0,25 mm. Foram considerados dois operadores, cada um realizando três medições, realizadas em três posições radiais equidistantes de 120° e três posições no sentido da altura medida no furo de 4 mm cada uma e com espaçamento entre as posições de 0,5 mm. A Figura 4 ilustra as posições das medições de rugosidade.

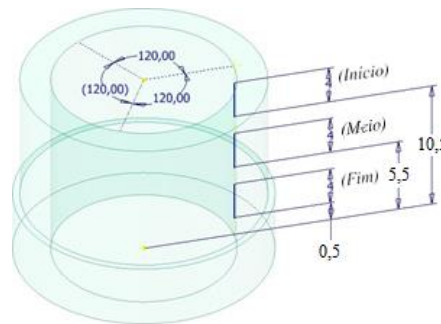


Figura 4. Posições de medição dos corpos de prova. Fonte: adaptado de (Pereira *et al.*, 2017).

As medições de circularidade e cilindridade foram realizadas no laboratório de metrologia do DEMEC/UFSJ. Foi utilizado um medidor de forma *Talyround 131* da *Taylor Hobson®*, auxiliado por um computador.

A qualidade de forma do furo foi avaliada por meio da leitura de 12 planos: 4 planos iniciais, 4 planos médios e 4 planos finais tomados automaticamente pelo *software ultra* da *Taylor Hobson®*.

Os testes experimentais seguiram um projeto composto central (CCD) com três variáveis de controle, $k = 3$, e três de ruído, $r = 3$. Foi considerado $n_f = 2^{(k+r-1)} = 32$ pontos fatoriais fracionários, com resolução VI, $n_a = 2 \times k = 6$ pontos axiais, e $n_c = 9$ pontos centrais, totalizando $N = 47$ experimentos. Todos os testes foram realizados em ordem aleatória.

A tabela 2 apresenta as variáveis de controle e ruído adotadas no fresamento helicoidal do aço inoxidável Super duplex UNS S32760, bem como os níveis aos quais foram adotados.

Tabela 2. Variáveis de controle e ruído e seus níveis.

Variáveis de controle	Níveis			Unidade
	-1	0	1	
Avanço axial/dente [fza]	0,10	0,15	0,20	$\mu\text{m}/\text{dente}$
Avanço tangencial/dente [fzt]	0,10	0,15	0,20	mm/dente
Velocidade de corte [vc]	35	50	65	m/min
Variáveis de ruído				
Balanço da ferramenta [lb]	27	29	31	mm
Altura de medida do furo [lto]	Início	Meio	Fim	mm
Vazão de fluido de corte [Q]	5	12,5	20	dm^3/min

Após a realização dos ensaios e das medições, foram utilizados métodos de regressão e inferência estatística, como o método dos mínimos quadrados ponderados (Weighted Least Squares – WLS) e teste t para modelagem e teste de significância dos efeitos das variáveis avaliadas na resposta de interesse.

As análises estatísticas foram conduzidas através da linguagem de programação R (R. Core, 2020). Para a modelagem os pacotes rsm (Lenth, 2009) e olsrr (Hebbali, 2020) foram utilizados.

Finalmente, para os gráficos, foram utilizados ggplot2 (Wickham, 2020). Para todas as análises estatísticas, o nível de significância utilizado foi $\alpha = 0,05$.

3. RESULTADOS

A tabela 3 apresenta o projeto composto central com os fatores de controle, fza , fzt e vc , e os fatores de ruído, lto , lb e Q , com as respostas monitoradas durante os experimentos, Fa e Fr e os medidos nos furos obtidos Ra , $Ront$ e $Cylt$. Os valores mínimos e máximos das respostas estão destacados em negrito.

Tabela 3. Planejamento experimental com as respostas.

Exp.	fza [$\mu\text{m}/\text{dente}$]	fzt [mm/dente]	vc [m/min]	lto [mm]	lb [-]	Q [dm^3/min]	Ra [μm]	Fa [kN]	Fr [kN]	$Ront$ [μm]	$Cylt$ [μm]
1	0,1	0,1	35	27	-1	-1	0,16	0,58	0,30	19,11	18,77
2	0,2	0,1	35	27	-1	1	0,23	0,84	0,33	13,08	12,21
3	0,1	0,2	35	27	-1	1	0,24	1,05	0,45	19,14	14,01
4	0,2	0,2	35	27	-1	-1	0,22	0,77	0,41	12,91	13,04
5	0,1	0,1	65	27	-1	1	0,19	0,30	0,36	22,12	17,64
6	0,2	0,1	65	27	-1	-1	0,19	0,59	0,28	32,48	24,63
7	0,1	0,2	65	27	-1	-1	0,20	0,53	0,35	19,42	13,23
8	0,2	0,2	65	27	-1	1	0,25	1,02	0,35	25,49	19,46
9	0,1	0,1	35	31	-1	1	0,20	0,42	0,24	16,44	11,54
10	0,2	0,1	35	31	-1	-1	0,15	0,41	0,29	12,80	8,61
11	0,1	0,2	35	31	-1	-1	0,24	0,30	0,38	20,14	15,04
12	0,2	0,2	35	31	-1	1	0,28	0,95	0,42	22,70	21,89
13	0,1	0,1	65	31	-1	-1	0,19	0,54	0,28	17,77	13,01
14	0,2	0,1	65	31	-1	1	0,20	0,91	0,31	14,67	13,03
15	0,1	0,2	65	31	-1	1	0,24	0,50	0,32	18,61	14,38
16	0,2	0,2	65	31	-1	-1	0,24	0,66	0,35	24,95	17,18
17	0,1	0,1	35	27	1	1	0,14	1,08	0,39	15,67	18,80
18	0,2	0,1	35	27	1	-1	0,15	0,69	0,29	13,08	12,63
19	0,1	0,2	35	27	1	-1	0,21	0,66	0,37	22,33	20,38
20	0,2	0,2	35	27	1	1	0,22	1,15	0,40	20,01	12,90
21	0,1	0,1	65	27	1	-1	0,19	0,70	0,33	15,46	11,17
22	0,2	0,1	65	27	1	1	0,17	0,74	0,27	16,97	12,43
23	0,1	0,2	65	27	1	1	0,16	0,81	0,35	23,23	22,69
24	0,2	0,2	65	27	1	-1	0,21	0,55	0,35	23,99	17,48
25	0,1	0,1	35	31	1	-1	0,18	0,75	0,32	13,15	12,95
26	0,2	0,1	35	31	1	1	0,18	1,17	0,31	18,41	14,52
27	0,1	0,2	35	31	1	1	0,24	1,05	0,42	13,97	12,45
28	0,2	0,2	35	31	1	-1	0,26	0,89	0,42	21,79	18,98
29	0,1	0,1	65	31	1	1	0,19	0,72	0,28	19,85	15,33
30	0,2	0,1	65	31	1	-1	0,17	0,86	0,28	16,08	11,72
31	0,1	0,2	65	31	1	-1	0,24	1,08	0,39	19,16	16,15
32	0,2	0,2	65	31	1	1	0,19	0,79	0,35	19,14	15,09
33	0,03	0,15	50	29	0	0	0,15	0,68	0,31	15,17	12,55
34	0,27	0,15	50	29	0	0	0,18	0,90	0,38	18,31	13,42
35	0,15	0,03	50	29	0	0	0,10	0,84	0,40	11,72	11,49
36	0,15	0,27	50	29	0	0	0,20	0,72	0,38	20,71	16,54
37	0,15	0,15	14,32	29	0	0	0,26	1,15	0,43	10,79	9,40
38	0,15	0,15	85,68	29	0	0	0,21	0,81	0,31	18,41	17,53
39	0,15	0,15	50	29	0	0	0,16	0,83	0,32	15,87	12,80
40	0,15	0,15	50	29	0	0	0,13	0,37	0,45	19,38	15,28
41	0,15	0,15	50	29	0	0	0,14	0,75	0,32	18,35	16,04

42	0,15	0,15	50	29	0	0	0,15	0,92	0,37	17,81	14,41
43	0,15	0,15	50	29	0	0	0,17	1,08	0,38	13,58	13,60
44	0,15	0,15	50	29	0	0	0,17	0,86	0,32	14,54	12,60
45	0,15	0,15	50	29	0	0	0,15	0,71	0,30	14,46	10,76
46	0,15	0,15	50	29	0	0	0,16	1,10	0,34	23,77	17,97
47	0,15	0,15	50	29	0	0	0,14	0,81	0,46	14,47	12,13

Os valores das respostas de rugosidade média Ra variaram entre 0,14 e 0,28 μm , conforme mostrado na tabela 3. Portanto indica a superioridade do fresamento helicoidal em relação aos métodos convencionais de furação, produzindo níveis equivalentes as de superfícies acabadas por retificação.

Através do teste de homocedasticidade de Breush-Pagan foi possível verificar a relação da variância dos erros dos modelos de regressão com os valores das variáveis independentes. Como os dados são heterocedásticos, realizou-se a modelagem através dos mínimos quadrados ponderados (WLS), onde os resultados que apresentam erros maiores são menos considerados no modelo. Pelo coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} , o modelo para rugosidade média Ra explica 95,21 % da variabilidade dos dados, indicando um ótimo ajuste do modelo.

A Figura 5 apresenta os gráficos dos efeitos principais e das interações. Como observado previamente, a discussão será focada nos efeitos significativos. Considerando o nível de significância adotado $\alpha=0,05$, observa-se que o avanço tangencial, fzt , apresentou um efeito significativo linear positivo na rugosidade, enquanto a velocidade de corte, vc , apresentou um efeito quadrático significativo com concavidade para cima. Obtêm-se baixos valores de rugosidade (Ra : 0,17 μm) com velocidade de corte de 50 m/min. Sobre os efeitos significativos do ruído, o comprimento em balanço lto apresentou efeito linear positivo, podendo ser resultado da deflexão da ferramenta ou instabilidade do processo, enquanto a altura de medida lb apresentou um efeito linear negativo na rugosidade Ra . Neste caso, observou-se uma dificuldade em manter a rugosidade constante em toda profundidade do furo usinado.

Em relação as interações (*processo x ruído*), $fzt*vc$, $fzt*lto$ e $vc*Q$ são significativas, o que evidencia que o efeito de uma variável de controle depende do nível das demais, não podendo ser avaliada apenas de forma isolada.

Dentre as interações geradas pelo modelo, pode-se dizer que $fzt*vc$ causam um aumento de Ra quando o avanço tangencial e a velocidade de corte atingem valores altos. Da mesma forma que $fzt*lto$ também aumentam Ra com níveis altos de comprimento em balanço e velocidade de corte. No caso da interação $vc*Q$, em valores médios de vc em torno de 50 m/min obtêm-se baixas rugosidades em torno de 0,17 μm independente da vazão de fluido de corte.

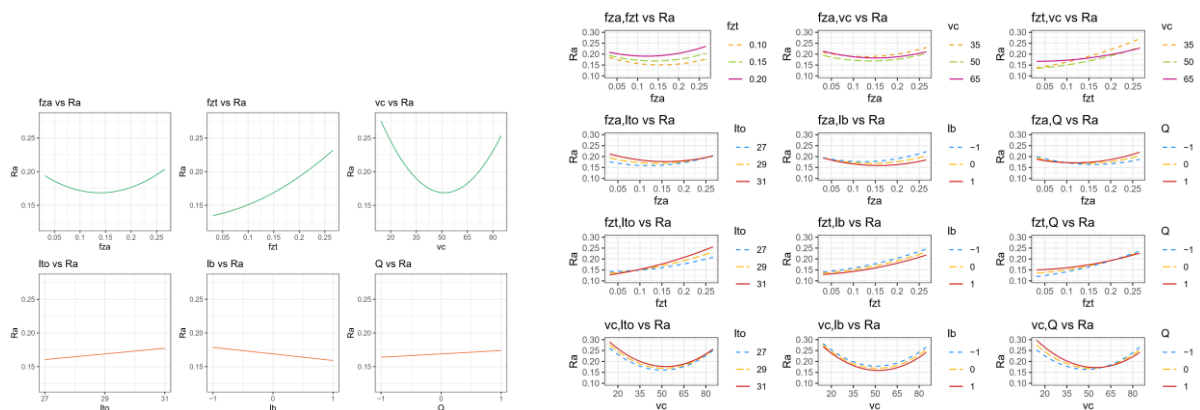


Figura 5. Gráfico dos efeitos principais e as interações para a resposta rugosidade média (Ra).

De acordo com a tabela 3, os valores das respostas de força axial Fa variaram entre 0,30 e 1,17 kN. Pelo coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} , o modelo para força axial Fa explica 95,98 % da variabilidade dos dados, indicando um ótimo ajuste do modelo.

A figura 6 mostra os efeitos principais e as interações da força axial Fa . Todos os efeitos lineares e quadráticos das variáveis de processo foram significativos. No caso, fza apresentou um efeito linear positivo, fzt um efeito linear positivo com um efeito quadrático côncavo para baixo e vc um efeito linear negativo com um efeito quadrático côncavo para cima.

Levando em consideração as variáveis de ruído, apenas lb foi significativo com efeito linear positivo. O erro geométrico aumenta linearmente do início ao fim do furo, o qual pode ser uma consequência do aumento do contato comprimento entre a ferramenta e a parede do furo, causando um aumento na força axial.

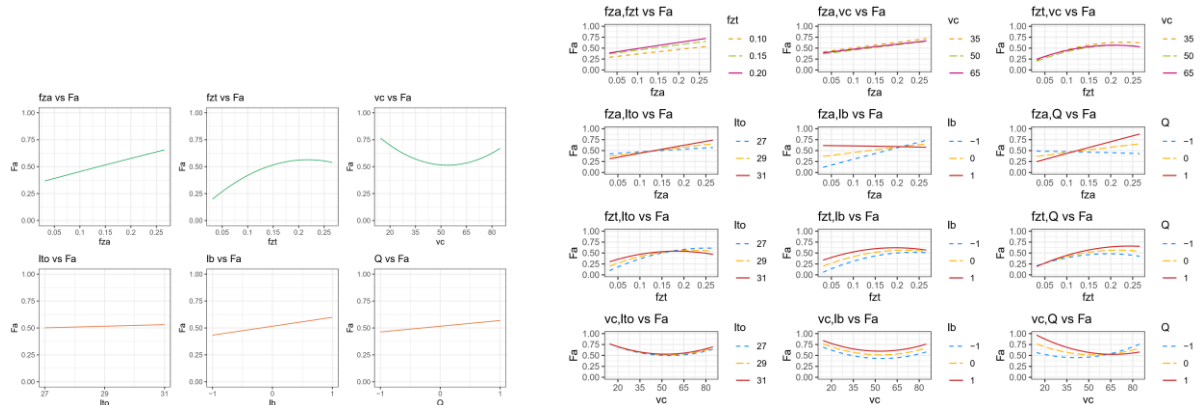


Figura 6. Gráfico dos efeitos principais e as interações para a resposta força axial (F_a).

Considerando as interações significativas do processo, podemos observar que fza apresentou uma interação significativa com todas as variáveis de ruído. Para $fza = 0,15 \mu\text{m/dente}$ torna a força axial robusta com relação à lto , $fza = 0,2 \mu\text{m/dente}$ torna a força axial robusta com relação à lb , e $fza = 0,14 \mu\text{m/dente}$ torna a força axial robusta com relação à Q .

Em relação a resposta força resultante Fr , variaram entre 0,24 e 0,46 kN, como mostrado na tabela 3. Pelo coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} , o modelo para força resultante Fr explica 99,38 % da variabilidade dos dados, indicando um ótimo ajuste do modelo.

Os efeitos principais e as interações da força resultante Fr são mostrados na figura 7. Observou-se que apenas os efeitos lineares fzt e vc foram significativos. Os valores da força resultante praticamente se mantém constante e abaixo de 0,25 kN com a variação do avanço por dente. No entanto o avanço tangencial tem efeito positivo e a velocidade de corte um efeito negativo nas força resultantes.

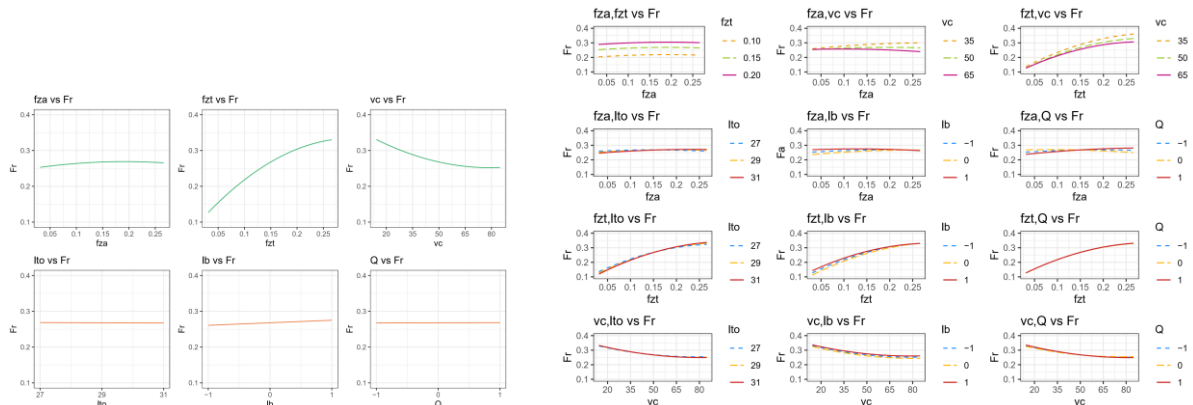


Figura 7. Gráfico dos efeitos principais e as interações para a resposta força resultante (Fr).

Os valores de circularidade R_{ont} medidos variaram de 10,79 à 32,48 μm , conforme a tabela 3. Após as análises estatísticas realizadas de forma análoga as rugosidades e as forças usinagem, o valor do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) foi de 99,98%, indicando um excelente ajuste para o modelo.

A Figura 8 mostra os gráficos de efeitos principais e de interações para os desvios de circularidade R_{ont} . Considerando os efeitos lineares, observou-se que fzt e vc foram estatisticamente significativos. O aumento dos níveis de avanço tangencial por dente e velocidade de corte resulta em maiores valores de circularidade. No caso do aumento da velocidade de corte tem um efeito positivo nesta tolerância, provocando uma instabilidade no processo.

O comprimento de balanço da ferramenta (lto), altura medida do furo (lb) e vazão do fluido (Q) não apresentaram efeito significativo nos valores de circularidade. No entanto, as interações geradas pelo modelo $fza*vc$, $fzt*lto$, $vc*lto$ e $vc*lb$ foram significativos e causaram uma redução da circularidade com avanço tangencial por dente até 0,15 mm/dente e velocidade de corte até 45 m/min. Observou-se também que o processo apresenta robustez, ou independe da vazão de fluido para fza 0,15 $\mu\text{m/dente}$ e vc de 50 m/min.

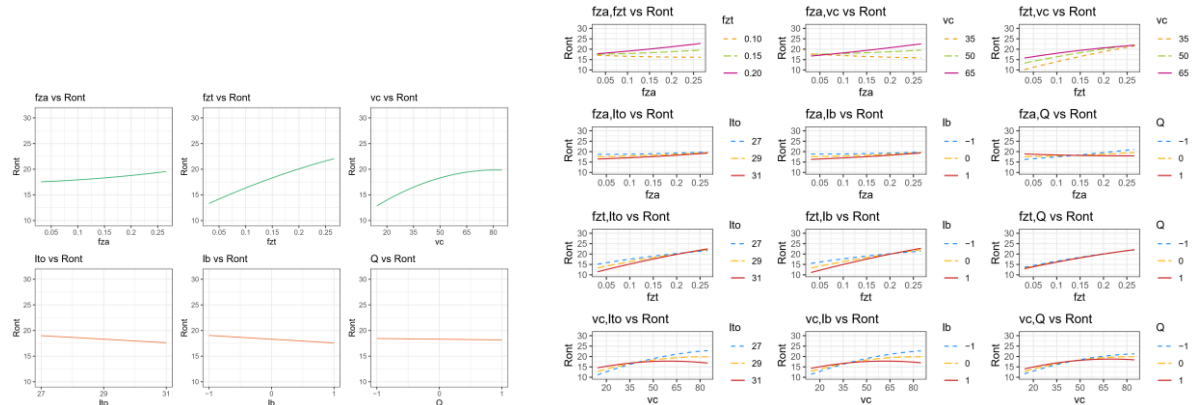


Figura 8. Gráfico dos efeitos principais e as interações para a resposta de circularidade (*Ront*).

Ao comparar os resultados, foi identificado uma diminuição significativa na magnitude da cilindridade do furo em relação aos desvios da circularidade. Os valores do desvio de cilindridade ficaram entre 8,61 à 24,63 μm , segundo a tabela 3.

Após as análises realizadas, obteve-se um coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} de 88,32 %, considerado um bom ajuste do modelo. Conforme mostrado na Figura 9 observou-se que os efeitos lineares *fzt*, *vc* e *lto* foram estatisticamente significativos com valor $p < 0,05$. Os valores de desvio de cilindridade praticamente se mantêm constante e abaixo de 15 μm com a variação do avanço axial por dente. No entanto, o avanço tangencial por dente e a velocidade de corte afetam positivamente esta tolerância. Em relação ao comprimento de balanço da ferramenta, houve uma redução da cilindridade com o aumento desta variável de ruído.

Em relação as interações, apenas *fza*lb*, *fzt*lb* e *vc*lb* são significativos. Obtém-se desvios de cilindridade na faixa de 15 μm independente da variação do avanço axial por dente e dos fatores de ruído. No entanto, o avanço tangencial por dente e a velocidade de corte têm efeito positivo sobre a cilindridade. Com relação ao efeito positivo do ruído altura de medida *lb* no menor desvio de circularidade, pode ser explicado pelo maior contato da fresa com a parede do furo, quando se mede o fim do furo.

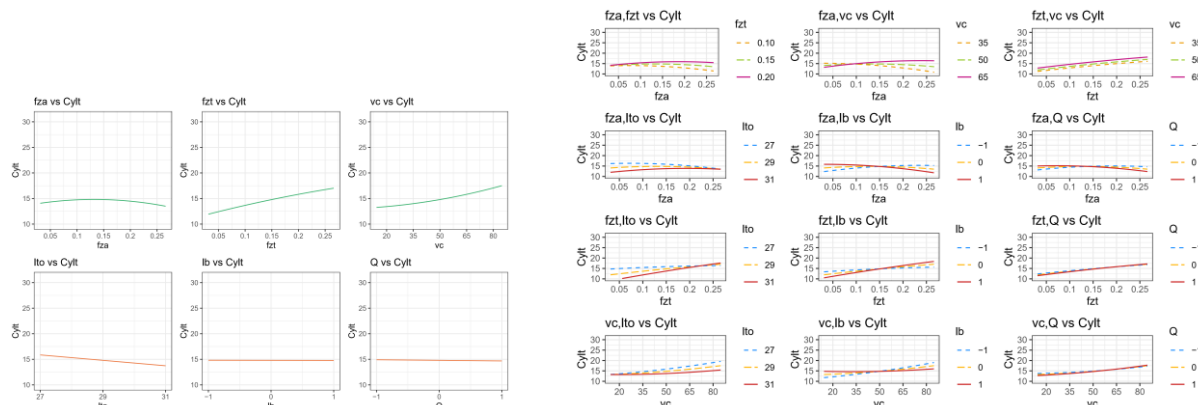


Figura 9. Gráfico dos efeitos principais e as interações para a resposta de cilindridade (*Cylt*).

4. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos no fresamento helicoidal do aço inoxidável super duplex UNS S32760, pode-se concluir:

- ✓ A velocidade de corte e o avanço tangencial por dente influenciaram estatisticamente a rugosidade do furo, no entanto os valores de R_a obtidos ficaram abaixo de 0,17 μm para avanço axial de corte na ordem de 0,15 $\mu\text{m}/\text{dente}$ e velocidade de corte de 50m/min, o que pode ser considerado um excelente resultado;
- ✓ As forças axiais (F_a) variaram entre 0,30 e 1,17 kN e o R^2_{aj} foi de 95,98%. indicando um ótimo ajuste do modelo. Observou-se que o avanço axial por dente apresentou uma interação significativa com todas as variáveis de ruído, tornam a força axial robusta com relação à *lto* para $fza=0,15 \mu\text{m}/\text{dente}$, com relação à *lb* para $fza= 0,2 \mu\text{m}/\text{dente}$ e $fza= 0,14 \mu\text{m}/\text{dente}$ com relação à *Q*.
- ✓ Com relação as forças resultantes (Fr), obteve-se um coeficiente de determinação ajustado de $R^2_{aj}= 99,38 \%$, variando os valores de força entre 0,24 e 0,46 kN. Os valores da força resultante praticamente se mantêm constante e abaixo de 0,25 kN com a variação do avanço por dente. No entanto o avanço tangencial tem efeito positivo e a velocidade de corte um efeito negativo nas força resultantes.

- ✓ Os valores de circularidade obtidos ficaram na faixa de 10,79 à 32,47 μm , para um R^2_{aj} de 99,98 % o qual indica um excelente ajuste do modelo. A circularidade apresentou robustez à variação da vazão de fluido para avanço axial por dente de 0,15 $\mu\text{m}/\text{dente}$ e velocidade de corte de 50 m/min;
- ✓ Para a cilíndricidade apenas o avanço tangencial por dente e a velocidade de corte influenciaram nos resultados, obtendo valores na faixa de 8,61 à 24,63 μm para um bom ajuste do modelo ($R^2_{aj}=88,32\%$). O processo de fresamento helicoidal apresentou robustez para o desvio de cilíndricidade obtendo valores abaixo de 15 μm idenpendente da variação do avanço axial por dente e de todos os fatores de ruído, vazão de fluido, balanço da fresa e altura de medida.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, Capes e à Fapemig pelo auxílio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Abrão, A. M.; Ribeiro, J. L. S., Davim, J. P., 2011. Surface integrity, in: *Machining of Hard Materials*. Springer, pp. 115–141.
- Brinksmeier, E., Fangmann, S., Meyer, I., 2008. Orbital drilling kinematics. *Production engineering* 2 (3), pp. 277–283.
- Chail, G. e Kangas, P., 2016. Super and hyper duplex stainless steels: structures, properties and applications. *Procedia Structural Integrity*, pp. 1755– 1762.
- Chater J., 2010. The european market for duplex stainless steels: rapid growth expected, *Stainless Steel World*, 1–1.
- Denkena, B., Boehnke, D., Dege, J. H., 2008. Helical milling of CFRP–titanium layer compounds. *CIRP Journal of manufacturing Science and Technology*, v. 1, n. 2, pp. 64–69.
- Gamarra, J. R., Diniz, A. E., 2018. 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* 40 (1), pp. 1–13.
- Hebbali, A., 2020. olsrr: Tools for Building OLS Regression Models, r package version 0.5.3. URL <https://CRAN.R-project.org/package=olsrr>.
- Iyer, R., Koshy, P., Ng, E., 2007. Helical milling: an enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47 (2), pp. 205–210.
- Korkut, I., Kasap, M., Ciftci, I., Seker, U., 2004. Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials & Design* 25 (4), pp. 303–305.
- Lawal, S. A., Choudhury, I. A., Nukman, Y., 2012. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals - a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 52, n. 1, pp. 1–12.
- Lenth, R. V., 2009. Response-surface methods in R, using rsm, *Journal of Statistical Software* 32 (7), pp. 1–17. doi:10.18637/jss.v032.i07.
- Nilsson, J. e Chai, G., 2011. The physical metallurgy of duplex stainless steels in- ternational conference & expo duplex. *Associazione Italiana di Metallurgia (AIM)*, Grado, Italy.
- Nomani, J., Pramanik, A., Hilditch, T., Littlefair G., 2017. Stagnation zone during the turning of duplex SAF 2205 stainless steels alloy. *Materials and Manufacturing Processes* 32 (13), pp. 1486–1489.
- Pereira, R. B. D., Brandão, L. C., Paiva, A. P. de, Ferreira, J. R., Davim, J. P., 2017. A review of helical milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, pp. 27–48.
- Pereira, R. B. D., Silva, L. A., Lauro, C. A., Brandão, L. C., Ferreira, J. R., Davim, J. P., 2019. Multi-objective robust design of helical milling hole quality on AISI H13 hardened steel by normalized normal constraint coupled with robust parameter design. *Applied Soft Computing Journal*, v. 75, p. 642–685.
- Petropoulos, G. P., Pandazaras, C. N., Davim, J. P., 2010. Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining. Em: Davim J. (ed.), *Surface Integrity in Machining*. Springer, London.
- Policena, M. R., Devitte, C., Fronza, G., Garcia R. F., Souza A. J., 2018. Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 98 (5), pp. 1617–1625.
- Saadatbakhsh M. H. et al. 2017. Experimental study of surface roughness and geometrical and dimensional tolerances in helical milling of AISI 4340 alloy steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 93, n. 9, pp. 4063–4074.
- Sadeghi H. M. et al., 2009. Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–6Al–4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 44, n. 5, pp. 487–500.
- Shan, Y. et al., 2011. Orbital milling hole of aerospace Al-alloy with big pitch. *Transactions of Tianjin University*, v. 17, n. 5, pp. 329–335.
- Tavares, S., Pardal, J., Almeida, B., Mendes, M., Freire, J., Vidal, A., 2018. Failure of superduplex stainless steel flange due to inadequate microstructure and fabrication process. *Engineering Failure Analysis*, pp. 1–10.

TEAM, R. Core. 2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: Available at: <https://www.R-project.org/>. [Google Scholar].

Zhou, L., Dong, H., Ke, Y., CHEN, G., 2017b. Analysis of the chip-splitting performance of a dedicated cutting tool in dry orbital drilling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 90, n. 5-8, p. 1809-1823.

Wang, Ch., Zhao, J., Zhou, Y., 2020. Mechanics and dynamics study of helical milling process for nickel-based superalloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 106, n. 5, pp. 2305-2316.

Wickham, H., 2016. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis, Springer-Verlag New York. URL <https://ggplot2.tidyverse.org>

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

STATISTICAL ANALYSIS OF ROUGHNESS, MACHINING FORCES AND GEOMETRIC DEVIATIONS IN HOLES OBTAINED BY HELICAL MILLING IN SUPER DUPLEX STAINLESS STEEL UNS S32760

José Veríssimo Ribeiro de Toledo, verissimo@unifei.edu.br¹

João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1.303, 37.500-903 Itajubá, Minas Gerais, Brasil

Robson Bruno Dutra Pereira, robsondutra@ufsj.edu.br²

² Center for Innovation in Modelling and Optimization of Systems - CIMOS, Center for Innovation in Sustainable - CIMS, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Federal University of São João del-Rei

Abstract. The super duplex stainless steels represent a significant advance in the manufacture of materials resistant to pitting corrosion and high mechanical strength with application in harsh environments such as petrochemical industry and oil and gas platforms, but present difficult machinability, characterized by the association of high rates of hardening and low thermal conductivity that can affect the quality of the machined surface. The helical milling process has been obtaining satisfactory results as an alternative to the conventional drilling process because it presents higher processing efficiency and lower cost compared to conventional drilling and allows the obtention of holes of different diameters with adjustment of the diameter of the helical trajectory resulting in high levels of surface quality, precision and correction of the dimensional quality. Due to the helical path performed by the cutter, there is the possibility to perform finishing operations without the need of tool change, allowing to obtain finished holes in a single operation, eliminating subsequent finishing operations. In this paper, the effects of cutting parameters on cutting forces, surface finish and geometric deviations (roundness and cylindricity) were evaluated using the helical milling process in a super duplex stainless steel UNS S32760 alloy. A central composite design coupled with response surface methodology was used for the purpose of modeling and estimating the effects, combined with control and noise variables on the responses of interest. The results showed that the tangential feed per tooth and the cutting speed were the factors that most influenced the roughness, roundness and cylindricity of the machined holes, presenting robustness to the variation of the fluid flow rate for the axial feed per tooth in the case of roundness and robustness for the cylindricity deviation obtaining values below 15 μ m independent of the variation of the axial feed per tooth and of all noise variables.

Keywords: Super duplex steel; Helical milling; Machining forces; Roughness; Form errors

RESPONSIBILITY NOTICE

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