

A UTILIZAÇÃO DE PLANEJAMENTO FATORIAL PARA A PREDIÇÃO DE ACABAMENTO SUPERFICIAL DO PROCESSO DE FRESAMENTO DO AÇO ENDURECIDO SAE4340

Renan Sanches Costa

Aderval Ferreira de Lima filho

Nelson Wilson Paschoalinoto

Jorge Antonio Giles Ferrer

Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica – Rua Santo André, 680 - Boa Vista, São Caetano do Sul - SP, 09572-000

renan.ca.1995@hotmail.com; aderval.filho@sp.senai.br; nelson.paschoalinoto@sp.senai.br; jorge.ferrer@sp.senai.br

Resumo. O foco deste trabalho foi a utilização de um planejamento fatorial para a predição de acabamento superficial de um processo de fresamento do aço endurecido SAE4340. Um corpo de prova foi dividido em 20 partes para 10 ensaios distintos e outras 10 réplicas. Após os ensaios foi medida a rugosidade total e a rugosidade média com um rugosímetro. Como saída do planejamento fatorial obteve-se um diagrama de Pareto, gráficos comparativos entre as variáveis de entrada e a rugosidade e a função resultante para cada análise. Observou-se que a profundidade de corte teve influência significativa na rugosidade total e que a velocidade de corte teve influência significativa na rugosidade média.

Palavras chave: Fresamento. Planejamento Fatorial. Rugosidade. Predição.

1. INTRODUÇÃO

No decorrer dos anos a competitividade e muitos outros fatores foram contribuintes para evolução dos processos e dos recursos na manufatura (SANDVIK, 2002). Os processos de usinagem de acabamento superficial e os estudos sobre os aços endurecidos estão cada vez mais em destaque no setor industrial devido à possibilidade de eliminar ou reduzir o processo de retificação, possibilitando a redução de custo e tempo de fabricação (Soares, 2017).

A relevância deste trabalho é pautada devido a esta necessidade e a significativa importância tecnológica e científica com os estudos sobre os aços endurecidos. Com este trabalho foi possível uma maior consolidação e solidez dos resultados apresentados para as condições propostas do trabalho.

O trabalho propôs diferentes condições de fresamento do aço SAE4340 utilizando a fresa esférica do tipo “ball-nose”. Com os dados de entrada criou-se um planejamento estatístico fatorial. Com ele foi possível a predição da rugosidade de uma superfície, de acordo com os parâmetros de corte fornecidos pelo fabricante do inserto ISCAR.

Para isso foi preciso medir a rugosidade da peça depois de usinar com as velocidades de corte variadas para estabelecer parâmetros para a tabela. As variáveis independentes foram: Velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z) e profundidade de corte (a_p). As variáveis dependentes foram: Passe lateral (a_e), diâmetro da fresa (D_c), ângulo de corte e a altura da crista (h). A variável “target” foi a rugosidade total e a rugosidade média.

O material utilizado foi o aço SAE 4340. Este material possui alta resistência à fadiga, resistência mecânica e resistência à fratura média. Devido a homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal em pequenas ou grandes seções, uma das principais aplicações desse aço é a fabricação de componentes para sistemas mecânicos e estruturais, tais como: eixos, engrenagens, cilindros, entre outros. (Gerdau, 2017).

Apesar da grande diversidade na utilização, este aço é de baixa soldabilidade e usinabilidade (Favorit, 2016). Os valores da composição química do material utilizado são apresentados na “Tab. 1”.

Tabela 1. Composição química média do aço SAE4340 (Gerdau, 2017).

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
Percentual	0,38 – 0,43	0,15 – 0,3	0,6 – 0,8	0,8 – 1,1	1,65 – 2,0	0,2 – 0,3	Rest.

O planejamento fatorial foi o método utilizado para análise dos resultados dos experimentos. Consiste em um método estatístico ativo, pois são feitos diversos experimentos planejados. As entradas são previamente calculadas e as saídas ou resultados vão produzir informações que podem auxiliar na melhoria no processo, bem como na predição de novos experimentos (Montgomery, 2004).

2. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Antes de iniciar o processo de fresamento, mediu-se a dureza da peça com um durômetro da empresa Mitutoyo, modelo Wizhard. Obteve-se como resultado uma média de 52,9 HRC.

A peça usinada foi separada em 20 partes para os 20 ensaios conforme apresentado na “Fig. 1(A)” e foram usinados com os parâmetros da tabela do planejamento fatorial. A usinagem foi realizada em um centro de usinagem ROMI, modelo D600 e comando SINUMERIK 828D, conforme apresentado na “Fig. 1(B)”. Para o modelamento virtual (CAD) foi utilizado o software CATIA V5 R20 e a programação de usinagem (CAM) foi feita com o auxílio o software NX 10.0. A peça foi modelada com um ângulo de 15° na superfície (valor recomendado por catálogo pela SANDVIK) para livrar o ponto crítico da ferramenta esférica onde o valor da velocidade angular seria igual a zero, ou seja, na ponta da ferramenta, conforme apresentado na “Fig. 2(C)”.

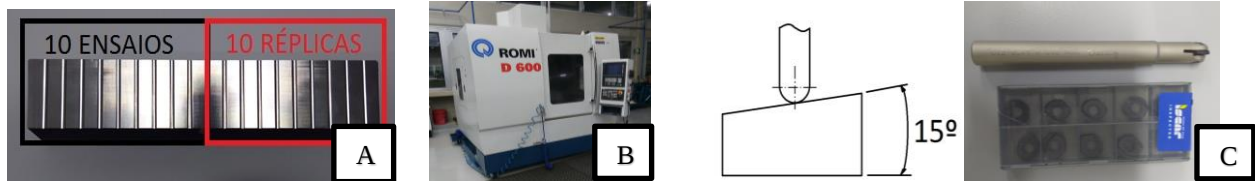


Figura 2. (A) Foto da peça usinada e dividida conforme ensaios de usinagem, (B) foto do centro de usinagem ROMI, modelo D600 e (C) imagem ilustrativa do ponto da ferramenta esférica na peça e dos inserts esféricos (Dados do autor).

2.1. Execução do planejamento fatorial

O planejamento fatorial utilizado foi do tipo 2³ com 2 pontos centrais, totalizando 10 experimentos acrescido por 10 réplicas. Totalizou-se ao todo 20 ensaios, conforme apresentado na “Tab. 2”. Os dados de entrada foram calculados com base nos parâmetros de corte fornecidos pelo catálogo do fabricante do inserto ISCAR, 2017. O inserto utilizado é do tipo esférico com o diâmetro de 12mm, com 2 cortes, revestimento de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) e modelo HCR D120-QF. Segundo a tabela do fabricante os dados de velocidade de corte (vc) variam entre 55 – 75 m/min para aços endurecidos até 56 HRC e o avanço por dente (f_z) varia de 0,05 – 0,25 mm para operações de acabamento superficial. Os valores utilizados para a profundidade de corte (a_p) foram similares aos que são utilizados para operações de acabamento superficiais em moldes, onde são adotados 0,05 – 0,20mm, conforme catálogo SANDVIK, 2002.

Tabela 2. Planejamento fatorial para usinagem dos 20 ensaios (Dados do autor).

Ensaio	Diâmetro efetivo (mm)	Rotação (RPM)	Avanço mm/min	Velocidade de Corte m/min (vc)	Avanço por dente mm/t (fz)	Passo lateral (ae)	Penetração mm (ap)	Altura de crista
1	3,1	5647	565	55	0,05	0,5 mm	0,05	0,005 mm
2	3,1	7701	770	75	0,05	0,5 mm	0,05	0,005 mm
3	3,1	5647	2824	55	0,25	0,5 mm	0,05	0,005 mm
4	3,1	7701	3851	75	0,25	0,5 mm	0,05	0,005 mm
5	3,1	5647	565	55	0,05	0,5 mm	0,2	0,005 mm
6	3,1	7701	770	75	0,05	0,5 mm	0,2	0,005 mm
7	3,1	5647	2824	55	0,25	0,5 mm	0,2	0,005 mm
8	3,1	7701	3851	75	0,25	0,5 mm	0,2	0,005 mm
9	3,1	6674	2002	65	0,15	0,5 mm	0,125	0,005 mm
10	3,1	6674	2002	65	0,15	0,5 mm	0,125	0,005 mm
11	3,1	5647	565	55	0,05	0,5 mm	0,05	0,005 mm
12	3,1	7701	770	75	0,05	0,5 mm	0,05	0,005 mm
13	3,1	5647	2824	55	0,25	0,5 mm	0,05	0,005 mm
14	3,1	7701	3851	75	0,25	0,5 mm	0,05	0,005 mm
15	3,1	5647	565	55	0,05	0,5 mm	0,2	0,005 mm
16	3,1	7701	770	75	0,05	0,5 mm	0,2	0,005 mm
17	3,1	5647	2824	55	0,25	0,5 mm	0,2	0,005 mm
18	3,1	7701	3851	75	0,25	0,5 mm	0,2	0,005 mm
19	3,1	6674	2002	65	0,15	0,5 mm	0,125	0,005 mm
20	3,1	6674	2002	65	0,15	0,5 mm	0,125	0,005 mm

2.2. Medições de rugosidade

Após a usinagem da peça, foram registrados os dados de rugosidade com o rugosímetro SURFCOM da empresa ZEISS, modelo 1900SD2 e com o software Roughness Measurement V14.04. A máquina foi configurada conforme norma ISO-97 com comprimento de medição 4mm, *cut-off* de 0,8mm e velocidade de medição de 0,15mm/segundos. Os parâmetros escolhidos para serem medidos foram o R_t (rugosidade total) e o R_a (rugosidade média). O parâmetro R_a é muito utilizado em usinagens nos casos em que a peça tenha possíveis “falhas” no meio do processo. A medida não é

tão alterada pois o resultado deste parâmetro é a média aritmética de 5 *cut-off's* dentro do comprimento total de amostragem.

Cada ensaio de usinagem foi medido por 3 vezes e feito uma média entre eles. Ao todo foram 60 medições resultando nos valores de rugosidade (30 medições dos primeiros 10 ensaios e outras 30 medições para as réplicas). Os resultados das medições de rugosidade total e rugosidade média são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3. Resultados das médias das medições de rugosidade total e rugosidade média (Dados do autor).

	Vc	Fz	ap	Ra	Rt
1	55	0,05	0,05	0,96	4,61
2	75	0,05	0,05	0,96	4,50
3	55	0,25	0,05	0,90	5,00
4	75	0,25	0,05	0,94	4,68
5	55	0,05	0,2	0,99	5,63
6	75	0,05	0,2	0,97	4,91
7	55	0,25	0,2	1,24	6,56
8	75	0,25	0,2	0,94	5,39
9	65	0,15	0,125	0,95	5,43
10	65	0,15	0,125	1,01	5,63
11	55	0,05	0,05	1,01	4,77
12	75	0,05	0,05	0,97	4,73
13	55	0,25	0,05	0,95	4,38
14	75	0,25	0,05	0,82	4,42
15	55	0,05	0,2	0,96	5,19
16	75	0,05	0,2	0,82	4,38
17	55	0,25	0,2	1,10	6,24
18	75	0,25	0,2	0,79	4,71
19	65	0,15	0,125	0,86	4,70
20	65	0,15	0,125	0,95	5,44

A peça foi apoiada por calços para compensar os 15° do ângulo da superfície e a medição foi no sentido longitudinal, ou seja, no sentido do passe lateral da usinagem justamente para medição da crista usinada conforme apresentado na “Fig. 3”.

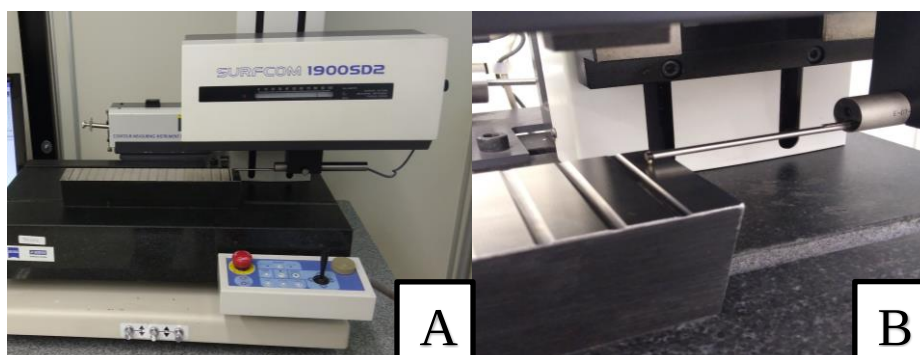


Figura 3. (A) Montagem para medição de rugosidade e (B) Sentido longitudinal da peça (Dados do autor).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o processo de desenho virtual, programação auxiliada por computador, planejamento fatorial, usinagem e medição de rugosidade, foram separados os valores finais de rugosidade dos ensaios e dos parâmetros que foram utilizados em cada um deles. Com esses valores descritos, foi possível a análise dos dados de usinagem por meio do software “Statistica”. Os valores utilizados para o software como dados de entrada foram velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z) e profundidade de corte (a_p). Esses valores foram relacionados aos dados de rugosidade de cada ensaio. Desta forma o software obteve como saída: superfícies de resposta, diagrama de Pareto e a função resultante para cada análise.

3.1. Diagrama de Pareto

O diagrama de Pareto é utilizado para ser ponderado o quanto cada variável independente (v_c , f_z e a_p) e as interações dentre eles, pode influenciar o resultado final do ensaio, ou seja, a rugosidade (variável dependente).

Neste diagrama, conforme apresentado na “Fig. 4(A)”, nota-se com 95% de confiança a influência significativa da profundidade de corte (a_p), da velocidade de corte e da interação entre estes fatores para o resultado da **rugosidade**

total. E na “Fig. 4(B)” nota-se influência significativa da velocidade de corte (v_c), da interação entre velocidade de corte e profundidade de corte e da interação entre avanço por dente e profundidade de corte para o resultado da **rugosidade média**.

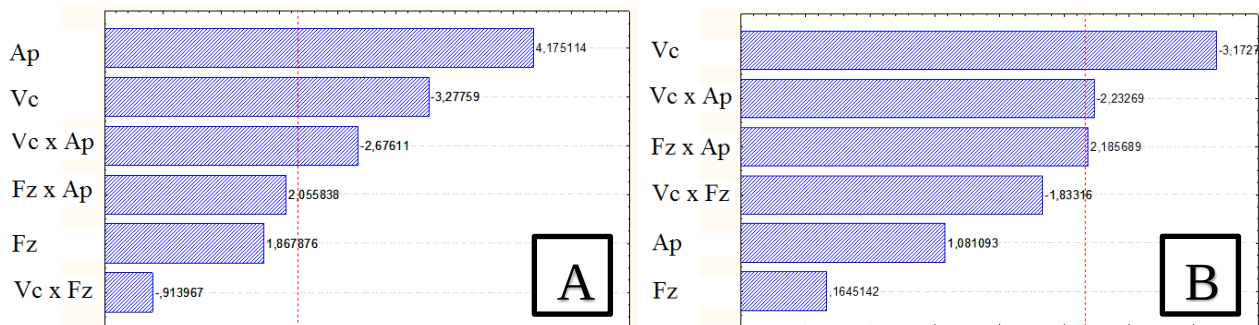


Figura 4. (A) Diagrama de Pareto da rugosidade total, (B) Diagrama de Pareto da rugosidade média (Dados do autor).

3.2. Rugosidade total

Com o procedimento estatístico, nota-se na “Fig. 5(A)” que quanto maior a velocidade de corte e menor o avanço por dente, atinge-se as menores rugosidades totais. Nota-se na “Fig. 5(B)” e na “Fig. 5(C)” que as menores profundidades de corte, propiciam menores rugosidades.

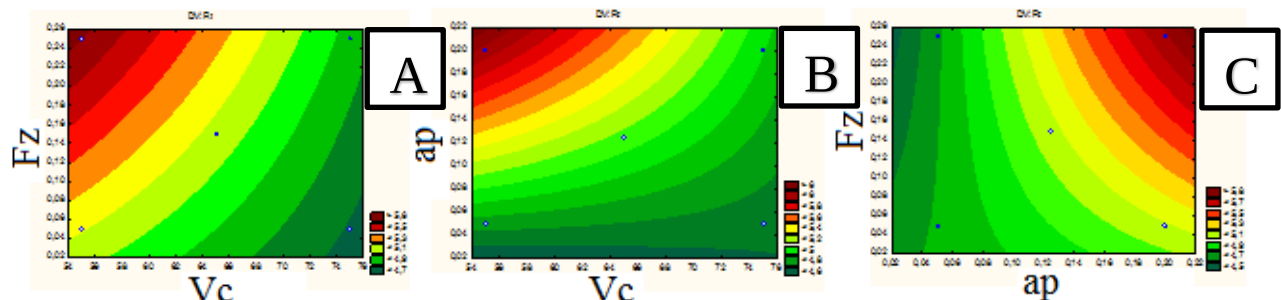


Figura 5. (A) Gráfico comparativo f_z x v_c , (B) Gráfico comparativo a_p x v_c e (C) Gráfico comparativo f_z x a_p (Dados do autor).

3.3. Rugosidade média

Nota-se na “Fig. 6(A)” que a combinação de alta velocidade de corte com valores altos de avanço por dente propicia valores menores de rugosidade média. Nota-se na “Fig. 6(B)” que a rugosidade média tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte. Quando os valores desta ultrapassam aproximadamente 72m/min a rugosidade média diminui com o aumento da profundidade de corte. Nota-se na “Fig. 6(C)” que a combinação de menores profundidades de corte com maiores valores de avanço por dente, propiciam menores rugosidades, bem como a combinação de menores valores de avanço por dente com altos valores de profundidade de corte.

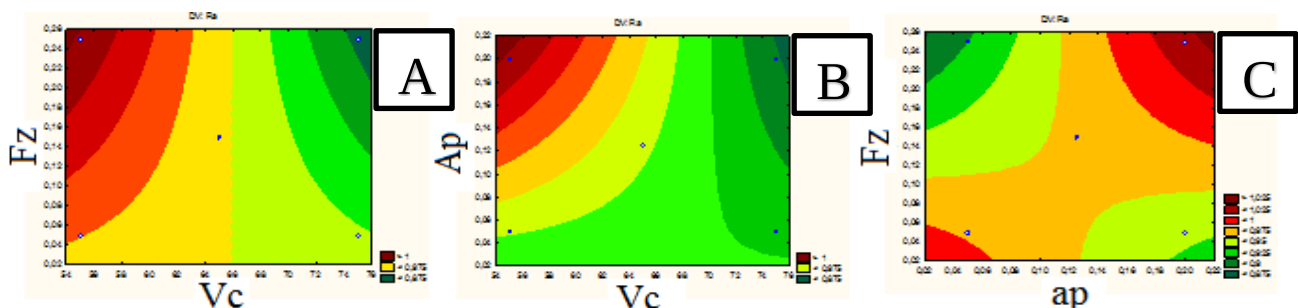


Figura 6. (A) Gráfico comparativo f_z x v_c , (B) Gráfico comparativo a_p x v_c e (C) Gráfico comparativo f_z x a_p (Dados do autor).

3.4. Funções estatísticas para predição das variáveis “target”

Como resultante dos procedimentos estatísticos o software gerou as funções resultantes de predição de rugosidade. Desta forma é possível prever a qualidade final da rugosidade média e da rugosidade total ao se utilizar outros valores nas variáveis independentes antes mesmo de se usinar a peça. As funções estatísticas são apresentadas na “Tab.4”.

Tabela 4. Resultados das funções de predição de rugosidade (Dados do autor).

Ra	FUNÇÃO
Fz x Vc	$Ra=0,64+0,005*Vc+1,50*Fz-0,03*Vc*Fz-0,05*0,12*Vc+5,17*0,12*Fz+0,36$
ap x Vc	$Ra=0,64+0,005*Vc+2,91*ap-0,03*0,15*Vc-0,05*Vc*ap+5,17*0,15*ap+0,22$
Fz x ap	$Ra=0,64+1,50*Fz+2,91*ap-0,03*65*Fz-0,05*65*ap+5,17*ap*Fz+0,38$
Rt	FUNÇÃO
Fz x Vc	$Rt=3,18+0,02*Vc+3,89*Fz-0,08*Vc*Fz-0,32*0,12*Vc+24,31*0,12*Fz+2,73$
ap x Vc	$Rt=3,18+0,02*Vc+21,86*ap-0,08*0,15*Vc-0,32*Vc*ap+24,31*0,15*ap+0,58$
Fz x ap	$Rt=3,18+3,89*Fz+21,86*ap-0,08*65*Fz-0,32*65*ap+24,31*ap*Fz+1,47$

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fator que mais influenciou a rugosidade total para o processo foi a profundidade de corte (a_p), logo em seguida a velocidade de corte e depois a interação entre eles. Outro fator importante para essa análise foi o avanço por dente (f_z), porém menos significativo como mostrado no diagrama e nos gráficos.

Concluiu-se que os valores mínimos de rugosidade total ocorrem com menores profundidades de corte, maiores velocidades de corte e menores avanços por dente, o que já era esperado no início do processo, devido a operação de usinagem se tratar de um acabamento de superfície.

Com relação a rugosidade média, percebeu-se que o fator que mais influenciou no processo foi a velocidade de corte (v_c), logo em seguida a interação entre velocidade de corte e profundidade de corte e da interação entre avanço por dente e profundidade de corte.

Conclui-se que os menores valores de rugosidade média acontecem com maiores velocidades de corte o que já era esperado conforme literatura. Também conclui-se que uma das possibilidades da rugosidade total melhorar na redução da profundidade de corte é que quanto menor a remoção de material, menor os esforços da máquina e da ferramenta de corte, desta forma melhorando o acabamento da peça e diminuindo o valor da rugosidade.

Deve ser ponderado que os resultados deste trabalho são válidos apenas para as condições estipuladas no desenvolvimento. Desta forma, qualquer alteração, seja nos parâmetros ou no inserto ou no material, vão permitir que outras variáveis influenciem no processo, descartando assim essas conclusões e possibilitando um novo estudo dos ensaios para novos resultados de rugosidade.

A predição de rugosidade superficial antes do processo de usinagem contribui e permite que seja feita avaliações de custo/benefício bem como melhorias de processos.

5. AGRADECIMENTOS

Aos professores Aderval Ferreira, Nelson Paschoalinoto, Jorge Ferrer e à Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica pelo grande apoio em todo o processo de realização deste trabalho bem como pelo aprendizado nas aulas.

6. REFERÊNCIAS

- DINIZ, et al., 2006. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber, São Paulo, 5ª edição.
- FAVORIT, 2016. “Placas SAE 4340”. 20 mai. 2019 <<http://www.favorit.com.br/produtos/placas-1045-4140-8620-8640-4340/placas-sae-4340>>.
- GGD METALS, 2015. *Propriedades SAE 4340*. 20 out. 2017 <<http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-4340/>>.
- ISCAR, 2017. *Características Família Ballplus*. 15 nov. 2017 <<http://www.iscardobrasil.com.br/products.aspx/>>.
- MONTGOMERY, D. C., 2017. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Nova Iorque, 9ª edição.
- SANDVIK, 2013. *Fabricação de Moldes & Matrizes: ferramentas e métodos*. São Paulo, Vol. 8, p. 22-44.
- SOARES, L. R. L., 2017. *Fresamento do aço SAE 4340 temperado e revenido utilizando ferramentas de metal duro recobertas*. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- VILLARES, 2007. “Aços para construção mecânica”. *Aços para beneficiamento*. São Paulo Vol. 8, p. 54-59.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

THE USE OF FACTORIAL DESIGN FOR THE SURFACE FINISH PREDICTION OF THE SAE4340 HARDENED STEEL MILLING PROCESS

Renan Sanches Costa

Aderval Ferreira de Lima filho

Nelson Wilson Paschoalinoto

Jorge Antonio Giles Ferrer

Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica – Street Santo André, 680 - Boa Vista, São Caetano do Sul - SP, 09572-000

renan.ca.1995@hotmail.com; aderval.filho@sp.senai.br; nelson.paschoalinoto@sp.senai.br; jorge.ferrer@sp.senai.br

Abstract. *The focus of this article was the use of a factorial design to predict the surface finish of a SAE4340 hardened steel milling process. One specimen was divided into 20 parts for 10 distinct assays and another 10 replicates. After the tests the total roughness and the average roughness were measured with a rugosimeter. As an output of the factorial design, a Pareto diagram was obtained, comparative graphs between the input variables and the roughness and the resulting function for each analysis. It was observed that the depth of cut had a significant influence on the total roughness and that the cutting speed had a significant influence on the average roughness.*

Keywords: *Milling. Factorial Design. Roughness. Prediction.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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