

Análise estatística da influência dos parâmetros de corte no torneamento cilíndrico externo a seco no acabamento superficial do aço ABNT 1020

Antonio de Sousa Leitão Filho ¹

Carlos Airtton Castro Leite ¹

Lucas Silva Soares ¹

Antonio Santos Araujo Junior ¹

¹ Instituto Federal do Maranhão

¹ leitaofilho@acad.ifma.edu.br, ¹ leitecarlos@acad.ifma.edu.br, ¹ soares.lucas@acad.ifma.edu.br, ¹ asaraujojr@ifma.edu.br

Resumo. A rugosidade é o parâmetro de controle em operações de acabamento de uma peça usinada. Este trabalho propõe analisar, em um torneamento cilíndrico externo a seco, quais parâmetros de corte mais influenciam na rugosidade de uma peça de aço ABNT 1020, por meio do Planejamento de Experimento Fatorial e por Taguchi, que são métodos estatísticos significativamente úteis na melhoria de processos e produção. Assumindo 3 fatores, os parâmetros de corte foram estabelecidos com dois níveis, inferior e superior: a velocidade de corte (V_c), o avanço (f_z), profundidade de corte (a_p), com 8 ensaios no total. Um rugosímetro digital modelo TR 220 da Time Group Inc foi utilizado para se medir os valores de rugosidade média (R_a) e rugosidade máxima (R_y) em cada ensaio. Estes parâmetros de avaliação da rugosidade foram utilizados como respostas. Por conseguinte, na análise do experimento fatorial, pelo gráfico de Pareto dos efeitos, bem como, pela análise de experimento Taguchi, pelos gráficos dos efeitos principais, foi possível constatar que a rugosidade é mais influenciada pela velocidade de corte (V_c) e pela profundidade de corte (a_p), isto é, contribuindo potencialmente para maior ocorrência de erros microgeométricos na peça.

Palavras-chave: Rugosidade. Aço ABNT 1020. Planejamento de Experimentos. Taguchi.

1. INTRODUÇÃO

O aço carbono é uma liga ferro-carbono que apresenta cerca de 0,008% a 2% de carbono contendo alguns elementos residuais que podem ficar retidos durante o processo de fabricação. A porcentagem do carbono e o teor de impureza são responsáveis pelas características mecânicas apresentadas pela liga como resistência, ductibilidade, dureza ou usinabilidade (Castro, 2013). O aço carbono constitui o grupo de materiais mais utilizado na indústria, permitindo atender a demanda da maioria das aplicações práticas (Nogueira, 2002). Diante disso, por exemplo, cerca de 90% das tubulações industriais são de aço carbono, sendo extensivamente empregado na construção de adutoras, oleodutos, gasodutos e minerdutos, em virtude de seu baixo custo e da alta resistência a impactos, ductibilidade, tenacidade, facilidade de soldagem e boa usinabilidade. (Castro, 2013).

A usinagem é o processo de fabricação mais usado no mundo, em que são produzidas peças removendo o excesso de material em forma de cavacos. Contudo, é um processo essencialmente prático, mas envolve um elevado número de variáveis (Machado *et al.*, 2015), tornando a usinagem um processo imprevisível, pois é o único processo de deformação plástica que tem restrição fornecida pela ferramenta de corte (Black, 1989). Shaw (2005) afirma que é extremamente difícil entender o comportamento do mecanismo de deformação plástica da usinagem sem entender as variáveis de entrada que compõem o processo.

A operação de torneamento pode ser definida como a fabricação de peças cilíndricas, em um deslocamento da ferramenta é linear, enquanto a peça rotaciona, dimensões e formas específicas são obtidas, produzindo na peça vales e picos em escala microscópica, isto é, a rugosidade (Ferraresi, 2018). Em muitos casos a rugosidade é utilizada para controlar o processo de fabricação. De maneira que a rugosidade de uma superfície é controlada por vários parâmetros: máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, técnicas de aplicação do fluido, atmosfera e processo de usinagem.

Existe inúmeras variáveis que resultam em praticamente infinitos números de diferentes combinações de usinagem, mas existem algumas formas de lidar com este tipo de situação: por meio de tentativa e erro, requerendo uma análise a longo prazo; comparando com situações de usinagem similares; através de experimentos, mais restrito a condições específicas de usinagem a um custo alto, demandando muito tempo; e, por meio de modelos teóricos, que vão de modelos

matemáticos simples até análises computacionais.

Na prática, nenhuma dessas análises podem fornecer, de forma isolada, resultados satisfatórios, sendo recomendado a combinação de duas ou três destas análises (Ferraresi, 2018). No controle da rugosidade, por exemplo, métodos estatísticos podem identificar as contribuições relativas de cada um destes parâmetros (Whitehouse, 1997). Taguchi defendeu a aplicação de métodos estatísticos em experimentos, onde os processos se tornam insensíveis a fatores ambientais ou demais fatores que são difíceis de controlar, os chamados de fatores de ruído (Guedes, 2019).

Taguchi se refere a fatores de ruído como as causas de variabilidade no desempenho, pois os produtos podem obter falhas. Desta forma, o ruído faz com que o produto ou processo com características mensuráveis, se desvie do seu valor desejado. O método Taguchi é dividido em duas etapas que é a redução na variabilidade e aplicação do planejamento estratégico, ou seja, busca de menor desperdício, melhoria contínua, otimizando o processo e a redução de experimentos em situações reais, possibilitando desenvolvimento de novas pesquisas com baixo custo (Oztas *et al.*, 2009).

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo apresentar uma análise a respeito dos parâmetros de usinagem de maior influência na rugosidade, durante processo de torneamento manual a seco, do aço ABNT 1020, através de delineamento de experimento fatorial e por Taguchi.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi preparado um corpo de prova cilíndrico de aço ABNT 1020 com a composição química de acordo com Favorit (2021) na Tab. 1, com diâmetro de 27 mm e 120 mm de comprimento, com geometria definida conforme o desenho técnico da Fig. 1. O experimento foi realizado no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica e Materiais do Instituto Federal do Maranhão.

Tabela 1: Composição química do aço ABNT 1020 em % massa (Favorit, 2021)

	Composição química			
	C	Mn	S	P
ABNT	0,18 - 0,23	0,30 - 0,60	0.05	0.014

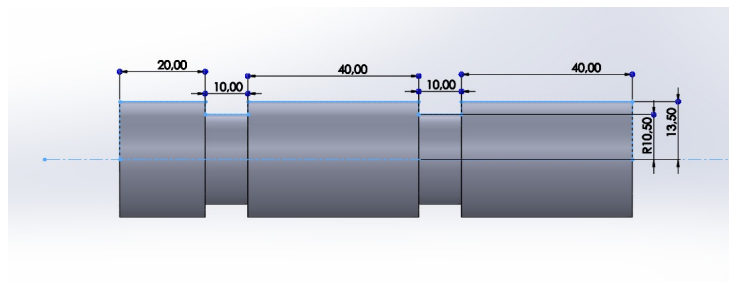
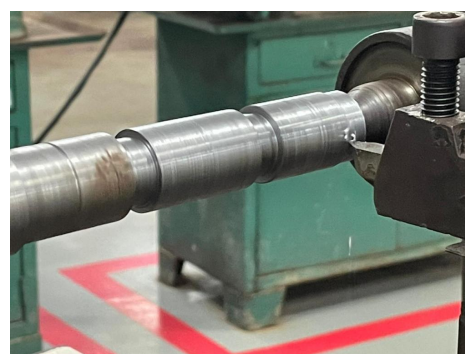


Figura 1: Desenho técnico da peça usinada (Autores, 2021)

Foi utilizado um torno mecânico manual NARDINI-NODUS 250, com 18 velocidades, de 25 a 2000 rpm e 8/5 CV de potência principal (Fig. 2); onde foi torneado com ferramenta de corte (bits) de aço rápido (HSS), com dureza de 62 ± 2 HRC, um tarugo de aço ABNT 1020 foi fornecido pelo Instituto Federal do Maranhão.



(a) Torno mecânico NARDINI - NODUS 250



(b) Sistema montado

Figura 2: Corpo de prova e equipamentos utilizados no trabalho (Autores, 2021)

Um rugosímetro digital, modelo TR 220 da Time Group Inc. foi empregado para medição da rugosidade média (R_a) e rugosidade máxima (R_y) em cada ensaio (Fig. 3). Para o planejamento do experimento fatorial e Taguchi, 3 parâmetros de usinagem (*velocidade de corte* - V_c , *avanço* - f_z , *profundidade de corte* - a_p), com dois níveis (mínimo e máximo) para cada parâmetro conforme demonstra a Tab. 2, serviram como dados de entrada. Foram feitas duas medidas no corpo

de prova. A primeira feita com a peça em 0°, logo após a primeira aferição a peça foi girada em 180° para coletar a segunda medida. Este procedimento gerou a Tab. 3, em que se usou como dado de saída a média entre as duas medidas de rugosidade.

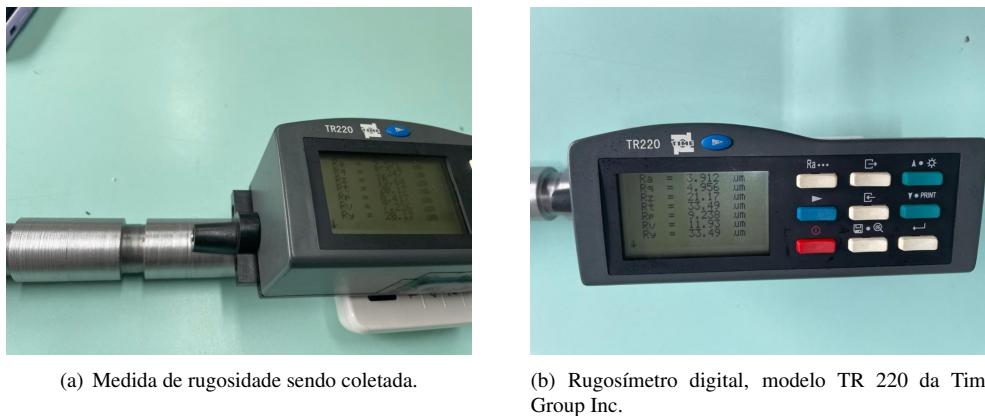


Figura 3: Procedimento de levantamento de dados de rugosidade (Autores,2021).

O software estatístico Minitab, versão 19, foi empregado o planejamento de experimento fatorial com nível de confiança de 1% e o método de Taguchi, com arranjo ortogonal L_8 , na análise dos dados, a fim de se verificar as variáveis mais significativas no processo, bem como as suas interações. Em análise de dados, o planejamento de experimentos mostra-se adequado para estudar vários fatores de processo e a complexidade de suas interações, de forma a aumentar a probabilidade de solucionar problemas (Benedicto, 2017).

Tabela 2: Parâmetros de corte como entrada de dados (Autores,2021)

Parâmetros	Níveis	
	1	2
Velocidade de Corte - V_c (m/min)	17.593	35.186
Avanço - f_z (mm/rev)	0.109	0.151
Profundidade de Corte - a_p (mm)	1	1.5

O método Taguchi proporciona realizar investigação de entrada do processo e suas interações com um número reduzido de experimentos. Esse método tem capacidade de generalização a partir da estrutura mista de matrizes fracionadas saturadas, possibilitando minimizar custos relativos ao experimento, tanto pela redução da variabilidade, quanto no cálculo da otimização.

Tabela 3: Dados dos ensaios de rugosidade (Autores,2021)

$a_p = 1,0$ mm				$a_p = 1,5$ mm			
		R_a (μm)	R_y (μm)			R_a (μm)	R_y (μm)
		1	2			1	2
ENSAIO 01	1	3.093	21.71	ENSAIO 05	1	4.708	32.14
	2	2.571	20.17		2	4.706	32.38
	Média	2.832	20.94		Média	4.707	32.26
ENSAIO 02	1	3.912	33.49	ENSAIO 06	1	7.4	38.08
	2	3.885	26.89		2	6.396	38.16
	Média	3.8985	30.19		Média	6.898	38.12
ENSAIO 03	1	5.643	30.25	ENSAIO 07	1	3.244	20.62
	2	6.427	38.33		2	5.016	37.38
	Média	6.035	34.29		Média	4.13	29
ENSAIO 04	1	5.255	34.66	ENSAIO 08	1	3.984	27.38
	2	6.096	44.27		2	3.962	25.72
	Média	5.6755	39.465		Média	3.973	26.55

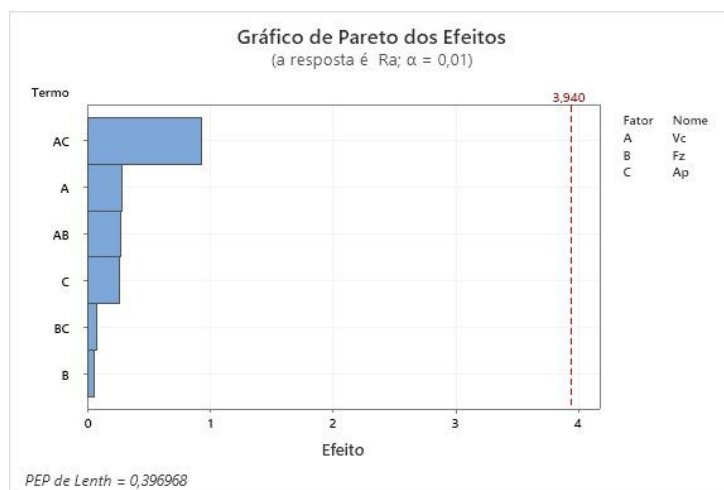
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como saída de dados foram gerados os dados de rugosidade média (R_a) e rugosidade máxima (R_y), calculados para cada amostra obtida pela combinação dos parâmetros de entrada (V_c , f_z e a_p) estão apresentados na Tabela 4.

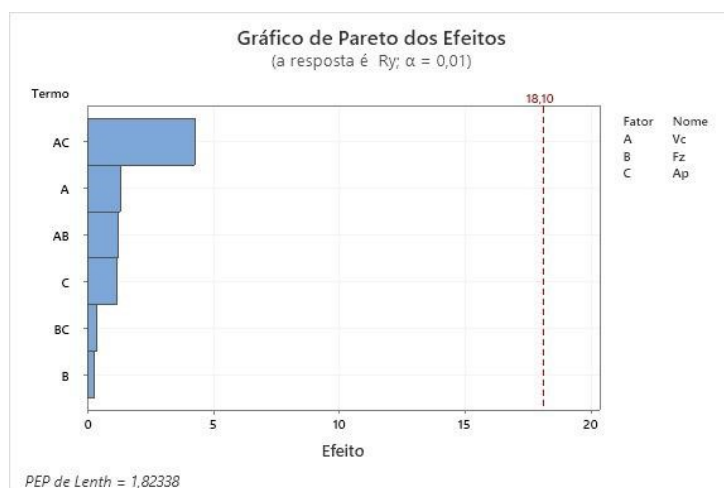
Tabela 4: Dados de saída para a rugosidade da peça usinada R_a e R_y (Autores,2021)

Ensaio	Parâmetros de entrada			Resultados	
	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	R_a	R_y
1	17.593	0.109	1	2.832	20.94
2	35.186	0.109	1	3.8985	30.19
3	17.593	0.151	1	6.035	34.29
4	35.186	0.151	1	5.6755	39.465
5	17.593	0.109	1.5	4.707	32.26
6	35.186	0.109	1.5	6.898	38.12
7	17.593	0.151	1.5	4.13	29
8	35.186	0.151	1.5	3.973	26.55

Com base na estatística do planejamento de experimento fatorial, usando o software Minitab, versão 19, foram gerados os gráficos de Pareto, para R_a e R_y . O gráfico de Pareto apresenta medidas absolutas dos efeitos padronizados desde o maior ao menor efeito. Sendo que os efeitos padronizados são estatísticas t que testam a hipótese nula de que o efeito é 0. No gráfico uma linha é traçada como referência para apontar quais efeitos são estatisticamente significativos no processo, para este caso com um fatorial 2^3 . A significância estatística é dependente do nível de confiança α adotado, em que percebeu-se que os fatores de maior influência foram: a interação de velocidade de corte (v_c) e profundidade de corte (a_p), seguida da velocidade de corte de forma individual, conforme Figuras 4 e 5.

Figura 4: Gráfico de Pareto dos Efeitos para R_a (Autores,2021)

Como o gráfico de Pareto determina a magnitude e a importância dos efeitos, para resposta R_a , a interação entre velocidade de corte V_c e profundidade de corte a_p foi mais expressiva na determinação do acabamento superficial da peça, o mesmo ocorrendo quando a resposta é R_y .

Figura 5: Gráfico de Pareto dos Efeitos para R_y (Autores,2021)

O método Taguchi usa arranjos ortogonais (matrizes experimentais), que se apresenta de forma genérica L_n , onde n equivale a quantidade de ensaios realizados, onde há variáveis que são controláveis e outras não controláveis, isto é, os fatores de ruído. Ao analisar a Figura 6, para a análise das médias, o parâmetro profundidade de corte (a_p) teve maior influência na rugosidade. As variáveis velocidade de corte (v_c) e avanço (f_z), tiveram influência menores no processo.

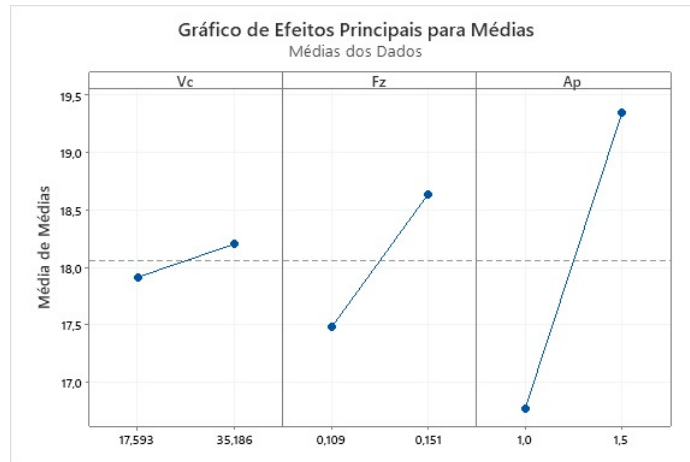


Figura 6: Gráfico dos Efeitos Principais para Médias (Autores,2021)

A razão Sinal-Ruído (S/N) estuda o efeito das variáveis de controle de um determinado processo, com base no desvio dos resultados em relação a um determinado valor alvo, valor este que se refere às características pretendidas para o processo em questão (Sun *et al.*, 2015). Taguchi sugere que a razão S/N seja calculada para cada condição de teste da matriz interna do arranjo experimental, identificando assim os níveis das variáveis de controle em que a variabilidade seja mínima.

Desta forma, maximizar a razão S/N é equivalente a minimizar da perda de qualidade. Dependendo do tipo de problema em estudo, isto é, do critério para a característica de qualidade a ser otimizada, diferentes razões S/N podem ser escolhidas, sendo elas: *smaller is better* (objetiva minimizar a característica de interesse), *bigger is better* (objetiva maximizar a característica de interesse) e *nominal is better* (objetiva atingir o valor nominal predeterminado). A razão S/N para o critério *smaller is better*, em que quanto menor o valor da resposta, melhor é para o processo, utilizada na análise dos resultados deste trabalho, pode ser definida matematicamente conforme a Eq. (1), onde y denota a característica de interesse, o subscrito i o número do experimento e n o número de réplicas do experimento i (Ross, 1991).

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

Ao analisar a Figura 7, de principais efeitos para desvio padrão, a variável profundidade de corte (a_p) também foi a que apresentou maior influência. A partir da Tabela 5, no nível 1, confirma-se que velocidade de corte (V_c) foi o fator de maior influência na razão sinal-ruído, seguido em ordem pela profundidade de corte (a_p) e avanço (f_z). Para atingir certa robustez, é necessário que haja a minimização dos fatores não controláveis do processo.

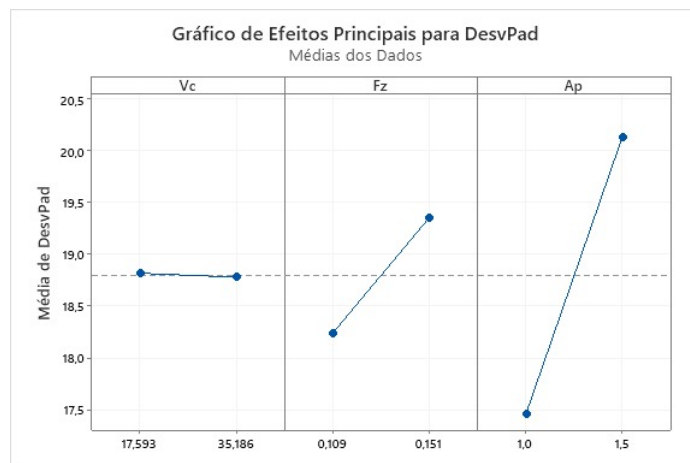
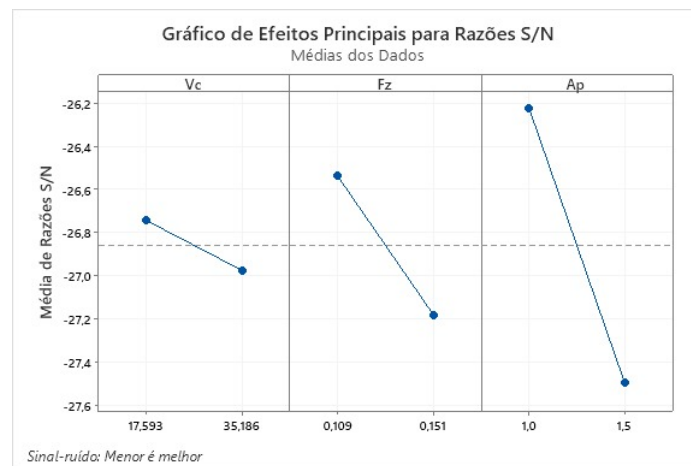


Figura 7: Efeitos Principais para DesvPad (Autores,2021)

Conforme a Figura 8, análise dos efeitos principais para razões S/N , observou-se que, assim como nas Fig. 6 e 7, a variável profundidade de corte (a_p) apresenta maiores valores. A partir da Tabela 5, confirma-se que profundidade de corte (a_p) é o fator de maior influência na razão sinal-ruído para o nível 2.

Figura 8: Efeitos Principais Para Razões S/N (Autores,2021)

O uso da razão Sinal – Ruído (S/R), é uma função logarítmica usada para otimizar o processo ou projeto do produto, minimizando a variabilidade. Esta grandeza é derivada da indústria de comunicações, onde já tem sido utilizada por quase um século, representando a relação entre sensibilidade e variabilidade de um dado sistema de medição. Desta maneira, no contexto da indústria, a relação entre custo-benefício é cada vez mais discutida, onde busca-se otimização de produção e processos como rotina.

Tabela 5: Resposta para Razões Sinal-Ruído (Autores,2021)

Nível	v_c	f_z	a_p
1	-26,74	-26,54	-26,22
2	-26,97	-27,18	-27,50
Delta	0,23	0,64	1,27
Posto	3	2	1

4. CONCLUSÃO

A qualidade de uma superfície usinada possui definição abrangente, onde a integridade superficial de uma peça tem relação direta com o acabamento, notadamente com a rugosidade, bem como com a ocorrência de outros fatores. As principais conclusões obtidas neste estudo da influência dos parâmetros de corte no acabamento superficial de uma peça em aço ABNT 1020 são:

- Na condição a seco, a interação entre os parâmetros de velocidade de corte V_c e profundidade a_p é mais significativa para o acabamento superficial da peça;
- A velocidade de corte V_c , individualmente, influencia diretamente na rugosidade do material;
- A resposta dos efeitos principais esclarece que a variável V_c apresenta menores médias e desvio padrão de rugosidade, enquanto a variável a_p apresenta maiores valores;
- Com os resultados obtidos, assegura-se que o avanço f_z não exerce influência significativa na rugosidade da peça.

5. REFERÊNCIAS

- Benedicto, E., C.D.R.E.M., 2017. “Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes”. *Procedia Engineering*, Vol. 184, No. 2, pp. 99–116.
- Black, J., 1989. “Introduction to machining processes.” *Materials Park, OH: ASM International, 1989. 1.*
- Castro, D.d.F., 2013. *Estudo da corrosão do aço 1020 no solo natural argiloso da região amazônica*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Triângulo Mineiro.
- Favorit, 2021. “Aço SAE 1020”. URL <https://favorit.com.br/produtos/acos-construcao-mecanica/aco-sae-1020>. Acesso em 25 de fev. 2021.
- Ferraresi, D., 2018. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Edgard Blucher, São Paulo, 18th edition.
- Guedes, M.V.V.R., 2019. *Análise da influência dos parâmetros de corte na rugosidade de superfície no torneamento cilíndrico do aço abnt 1045 através do método estatístico taguchi*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- Machado, Á.R., Coelho, R.T., Abrão, A.M. and da Silva, M.B., 2015. *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Blucher.

- Nogueira, P., 2002. “Estudo da viabilidade da utilização de filmes de carbono tipo diamante como camada de revestimento interno em dutos de transporte de petróleo”. *Boletim Técnico da Petrobras*, Vol. 45, No. 2, pp. 63–113.
- Oztas, A., Baykasoglu, A. and Ozbebek, H., 2009. “Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method”. Vol. 23, pp. 694–702. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.02.014.
- Ross, P.J., 1991. *Aplicações das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade*. Makron Books.
- Shaw, M.C., 2005. *Metal cutting principles*. Oxford University Press, New York, 2nd edition. ISBN 0195142063.
- Sun, G., Fang, J., Tian, X., Li, G. and Li, Q., 2015. “Discrete robust optimization algorithm based on taguchi method for structural crashworthiness design”. *Expert Systems with Applications*, Vol. 42, No. 9, pp. 4482–4492.
- Whitehouse, D.J., 1997. “Surface metrology”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 8, No. 9, p. 955.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Todos autores colaboraram igualmente neste trabalho e são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

STATISTICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS ON EXTERNAL DRY CYLINDRICAL TURNING ON THE SURFACE FINISH OF ABNT 1020 STEEL

Antonio de Sousa Leitão Filho ¹

Carlos Ailton Castro Leite ¹

Lucas Silva Soares ¹

Antonio Santos Araujo Junior ¹

¹ Instituto Federal do Maranhão

¹ leitaofilho@acad.ifma.edu.br, ¹ leitecarlos@acad.ifma.edu.br, ¹ soares.lucas@acad.ifma.edu.br, ¹ asaraujojr@ifma.edu.br

Abstract: Roughness is the control parameter in the finishing procedure of a machined part, which also interferes in the resistance to corrosion, wear and fatigue of the component. This work offers an analysis, in an external dry turning cylinder, which cutting parameters most influence the roughness of an ABNT 1020 steel part, through Factorial Experiment Planning and by Taguchi, which are necessary statistical methods in the improvement of production processes and . Assuming 3 factors, the cutting parameters were transformed with two levels, lower and upper: the cutting speed (V_c), the feed (f_z), depth of cut (a_p), with 8 tests in total. A digital trugosimeter model TR 220 from Time Group Inc was used to measure the values of average roughness (R_a) and maximum roughness (R_y) in each test. These roughness assessment parameters were used as answers. Consequently, in the analysis of the factorial experiment, by the Pareto graph of the effects, as well as, by the Taguchi experiment analysis, by the graphs of the main effects, it was possible to verify that the roughness it is more influenced by the cutting speed (V_c) and the depth of cut (a_p), that is, potentially contributing to a greater occurrence of microgeometric errors in the part.

Keywords: Roughness. ABNT 1020 steel. Design of Experiments. Taguchi.