

INFLUÊNCIA DA DUREZA DO MATERIAL SOBRE A RUGOSIDADE FINAL DE PEÇAS USINADAS

INFLUENCE OF MATERIAL HARDNESS ON THE FINAL ROUGHNESS OF MACHINED PARTS

Everton Maciel Francisco Mendes¹, Luã dos Santos Silva² & Prof. Me. Helio dos Santos França Junior³

DOI [10.5281/zenodo.10410705](https://doi.org/10.5281/zenodo.10410705)

UNIRJ / SOUZA MARQUES

RESUMO

A rugosidade final de peças usinadas é um dos parâmetros fundamentais do controle de qualidade. Dessa forma, promover investigação de fatores que influenciam no acabamento superficial é de suma importância para a indústria metal-mecânica. No presente trabalho, foi analisada a influência da dureza sobre a usinabilidade do material utilizando como critério o acabamento superficial. Nesse intento, foram realizadas análises de dureza e rugosidade em peças confeccionadas a partir do processo de torneamento a seco, em aço SAE 1045 laminado, com e sem

tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento. No processo de usinagem, foram utilizados insertos de metal duro, classe LT10 com revestimento PVD submicron, do fabricante Lamina Technologies, sendo os resultados tabulados e submetidos a tratamentos estatísticos de análise de variância (ANOVA) e teste t-Student. Os resultados comprovaram a influência da dureza sobre a rugosidade final da peça, apresentando coerência com vasta bibliografia sobre o tema.

Palavras-chave: Usinabilidade; Análise de Variância; Tratamentos térmicos.

¹Graduando da Fundação Técnico Educacional Souza Marques – Faculdade de Engenharia Mecânica. E-mail: evertonmendes.eng@gmail.com

² Graduando da Fundação Técnico Educacional Souza Marques – Faculdade de Engenharia Mecânica, E-mail: luan_santos_silva@hotmail.com

³ Professor Mestre em Engenharia Metalúrgica e Materiais – UFF. Prof. e Coordenador dos Cursos de Engenharia do Centro Universitário do Rio de Janeiro – UNIRJ. Professor da Fundação Técnico Educacional Souza Marques – Faculdade de Engenharia Mecânica – Laboratório de Tecnologia Mecânica. Professor da Fundação de Apoio à Escola Técnica – FAETEC – Escola Técnica Estadual República – ETER. E-mail: helio.junior@uniesp.edu.br

ABSTRACT

The final roughness of machined parts is one of the fundamental parameters of quality control. Therefore, promoting investigation of factors that influence surface finishing is of paramount importance for the metal-mechanical industry. In the present work, the influence of hardness on the machinability of the material was analyzed using surface finish as a criterion. In this attempt, hardness and roughness analyzes were carried out on parts made using the dry turning process, in laminated SAE 1045 steel, with and without

quenching heat treatment followed by tempering. In the machining process, carbide inserts, class LT10 with submicron PVD coating, from the manufacturer Lamina Technologies were used, with the results tabulated and subjected to statistical treatments of analysis of variance (ANOVA) and Student's t-test. The results confirmed the influence of hardness on the final roughness of the part, showing consistency with the vast bibliography on the subject.

Keywords: Machinability; Analysis of Variance; Thermal treatments

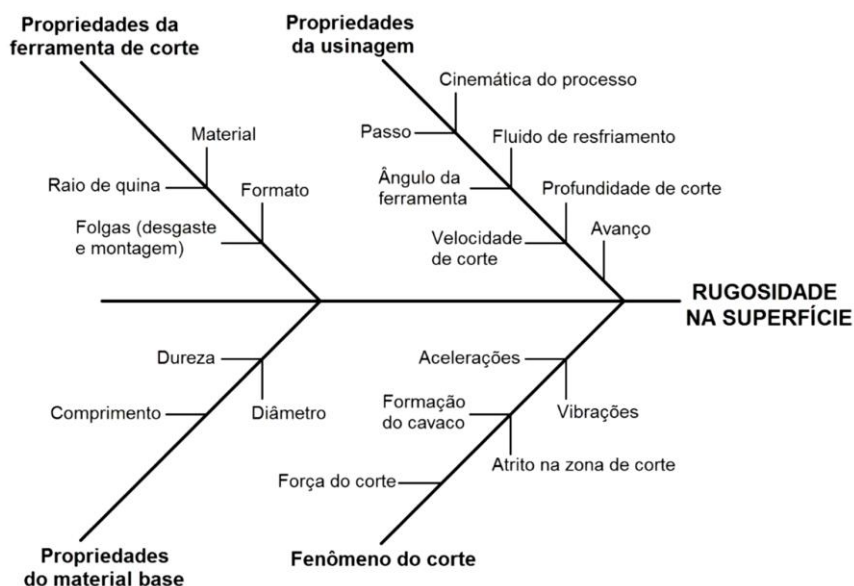
1. INTRODUÇÃO

A qualidade superficial das peças é caracterizada pelo acabamento obtido na usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas do metal na camada superficial. Dessa forma, a rugosidade oriunda do processo de corte, causada pelo rastro deixado pela combinação dos movimentos de corte e avanço, pode ser utilizada como parâmetro de saída para controlar o resultado de um processo de usinagem.(MACHADO et al., 2015, p.309).

A rugosidade final das peças é uma condição determinante para a qualidade do processo de usinagem, sendo influenciada por diversos fatores, tais como: a geometria da ferramenta, a rigidez do sistema máquina-ferramenta, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta. (NAKAYAMA *et al.*, 1966; SHOUCKRY, 1982 *apud* MACHADO *et al.*, 2015 p. 318).

Para Biasibetti *et. al.* (2019), a rugosidade da superfície pode ser empregada como indicador primário de acabamento, pois reflete diretamente as condições de corte empregadas no processo de usinagem. Os principais fatores e fenômenos que se manifestam durante o corte e influenciam na rugosidade do produto acabado estão demonstrados na Figura 1.

Figura 1: Fatores e fenômenos que se manifestam durante a usinagem e que resultam na rugosidade de uma superfície



Fonte: Biasibetti *et. al.* (2019)

A dureza do material exerce grande influência sobre o acabamento superficial. Machado *et al.* (2015, p. 320) mencionam que a composição química, a dureza, a microestrutura e a consistência metalúrgica do material da peça são fatores que também podem afetar o acabamento superficial, sendo melhorado com alta dureza e baixa ductilidade.

Associado à dureza, deve-se levar em conta a rigidez do sistema máquina-ferramenta, uma vez que maiores esforços de corte podem amplificar o fenômeno de vibração e, dessa forma, influenciar na rugosidade final da peça. Segundo Ferraresi (1977, p. 609), as trepidações caracterizadas pelas vibrações autoinduzidas de grande amplitude, prejudicam enormemente o acabamento superficial. Nesse caso, além dos esforços de corte, também influenciam na rugosidade final da peça as dimensões da peça e modo de fixação na máquina.

Por outro lado, a vida da ferramenta é influenciada pela dureza do material usinado. Segundo Araújo *et al.* (2020, p. 220), as propriedades mecânicas do material a ser usinado são as principais responsáveis pelo desgaste da ferramenta, uma vez que as partículas duras da peça tendem a encurtar a vida da ferramenta. Dessa forma, elevados níveis de desgaste de flanco, que afetam substancialmente a superfície de folga da ferramenta, impossibilitam a obtenção de tolerâncias dimensionais e de forma mais apertadas, assim como bons acabamentos superficiais sendo esse fenômeno crítico em operações de acabamento (DINIZ *et al.* 2014, p. 120).

Assim, segundo Colaco e Medeiros (2014, p. 19), a rugosidade não depende da mudança de um único parâmetro e, sim, de uma combinação de parâmetros ideais para uma determinada

situação, que depende, também, do material da peça, do material da ferramenta e da máquina ferramenta.

As condições sob as quais componentes mecânicos são usinados também influenciam no acabamento superficial. Pereira e Câmara (2021) por meio de ensaios experimentais, comprovaram que a rugosidade final das peças usinadas sofrem a influência da temperatura medida na operação de usinagem em associação com os parâmetros *velocidade de corte* e *avanço*.

Gonçalves *et al.* (2018) analisaram a rugosidade em função do avanço e da velocidade de corte com e sem fluido de corte. Os resultados indicaram que o avanço tem uma influência maior do que a velocidade de corte na rugosidade final da peça para o processo com fluido de corte do que para o processo sem fluido de corte.

Dessa forma, sendo o acabamento superficial um parâmetro importante para garantir a qualidade final do produto, torna-se mister entender os mecanismos que influenciam na rugosidade final de peças produzidas por intermédio do processo de usinagem, assim como variações nas propriedades do material podem impactar no resultado final.

Dessa maneira, o presente trabalho tem como proposta apresentar um estudo sobre a influência da dureza do material sobre a rugosidade final de peças usinadas, utilizando como critério de análise o acabamento superficial em corpos de prova usinados, sob condições específicas, cujos dados coletados foram compilados e tratados estatisticamente.

2. OBJETIVOS

Comprovar a influência da dureza sobre o acabamento superficial de peças usinadas sob as mesmas condições de usinagem.

3. METODOLOGIA

O material utilizado foi o aço SAE 1045 redondo e laminado, com diâmetro de 1.1/2" (38,10 mm), cuja composição química é apresentada na Tabela 1.

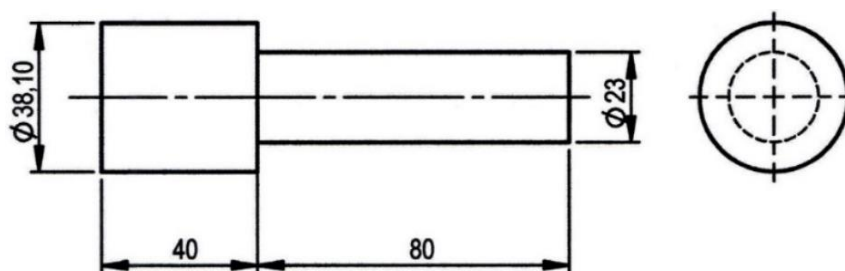
Tabela 1: Composição química do aço SAE 1045

Aço	C	P	Si	S	Mn
1045	0,43-0,50	0,4 máx	0,6 máx	0,05 máx	0,60-0,90

A elevação da dureza do material foi obtida a partir do tratamento térmico de têmpera seguida de revenimento, utilizando-se o forno elétrico tipo mufla, do fabricante QUIMIS, de temperatura máxima de 1200°C. O material foi inicialmente aquecido até 900°C por 25 minutos, seguido de resfriamento brusco realizado em água a temperatura ambiente. Na sequência, o mesmo foi reaquecido até a temperatura de 500°C por mais 25 minutos, sendo posteriormente resfriado lentamente, fora do forno.

Para a análise da rugosidade do material, foram pré-usinados 03 (três) corpos de prova que foram submetidos ao tratamento térmico de têmpera e revenimento e outros 03 (três) sem qualquer tratamento térmico, conforme indicado na Figura 2.

Figura 2: Corpo de prova para usinagem e análise de rugosidade



Para a usinagem dos corpos de prova foi utilizado um torno ROMI, modelo Tormax 30 de 5,6 kW de potência e rotação máxima de 2500 rpm. A ferramenta de corte utilizada foi um inserto de metal duro, intercambiável, classe LT10 com revestimento PVD submicron, do fabricante Lamina Technologies, cujas características são apresentadas no Tabela 2 e suporte na Tabela 3, ambos padrão ISO.

Tabela 2: Designação pastilha intercambiável de metal duro padrão ISO

Formato	Ângulo de folga	Tolerância	Caract. de usinagem e fixação	Comp. da aresta de corte	Espessura da pastilha	Raio de canto	Quebra cavaco	Direção de corte
T	C	M	T	11	02	04	N	N
Triangular	7°	0,05-0,20 0,13		11 mm	2,38 mm	0,4 mm		Neutro

Tabela 3: Especificação porta ferramenta padrão ISO

Sistema de fixação	Formato da pastilha	Ângulo de posição	Ângulo de folga	Sentido de corte	Altura da haste	Largura da haste	Comp. do porta ferramenta	Comp. da aresta
S	T	G	C	R	10	10	E	11
Por parafuso	Triangular	90°	7°	R	10 mm	10 mm	70 mm	11 mm

Os corpos de prova foram fixados à placa de três castanhas do torno em uma de suas extremidades, estando a outra apoiada em uma contra-ponta rotativa, de forma a mitigar a influência de vibrações autoinduzidas de grande amplitude que prejudicam o acabamento superficial da peça.

Os corpos de prova foram usinados, com o percurso de avanço pré-definido, em um único passe de acabamento, conforme parâmetros de corte indicados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetro de corte utilizados na usinagem dos corpos de prova

Parâmetros	Valores
Velocidade de corte (v_c)	180 m/min
Avanço por volta (f)	0,186 mm/volta
Profundidade de corte (p)	0,5 mm

A rugosidade das peças usinadas foi medida utilizando-se um rugosímetro digital, marca INSIZE, modelo ISR-C003. Utilizou-se o parâmetro Ra com comprimento de amostragem (cut-off) $\lambda = 0,8$ mm. As medições foram realizadas na metade do percurso usinado para que

eventuais oscilações ocorridas durante o processo de usinagem, que eventualmente pudessem influenciar nas medidas da rugosidade da peça, fossem desconsideradas. Dessa forma, foram realizadas 03 (três) medições em cada corpo de prova, intercaladas a cada 120° com relação à sua seção transversal.

Desta forma, foram realizadas 03 (três) medições em cada corpo de prova, com e sem tratamento térmico, num total 09 (nove) observações, sobre as quais foram realizadas análises variância (ANOVA) para avaliar a integridade dos dados dentro de cada grupo e, posteriormente, um análise t-Student para verificar a ocorrência de diferenças estatísticas significativas no resultados encontrados entre os grupos.

4. RESULTADOS

As medições de dureza foram executadas em posições aleatórias ao longo da seção transversal de cada corpo de prova, com três repetições, sendo uma mais próxima ao centro da peça e as demais em sua porção periférica.

As tabelas 5 e 6 apresentam os resultados obtidos com as medidas de dureza realizadas nos corpos de prova sem tratamento térmico e a análise de variância realizada a partir dos dados coletados.

Tabela 5: Medidas de dureza Brinell realizadas em corpos de prova sem tratamento térmico

CP	Medida 1	Medida 2	Medida 3	\bar{x}	σ^2	σ
CP1	185	195	200	193,3333	58,3333	7,6376
CP2	190	185	190	188,3333	8,3333	2,8868
CP3	195	195	195	195	0,0000	0,0000

Tabela 6: Análise de variância das medidas de dureza referente aos CP's sem tratamento térmico

Teste ANOVA	
Ho: médias são estatisticamente iguais	
H1: pelo menos uma das médias é diferente	
Var_entre:	36,1111
Var_dentro:	22,22222
Var_total:	25,6944
F_calc:	1,625000
F_tab:	5,14
ANOVA_teste: Ho aceita	

A análise das informações apresentadas nas Tabelas 5 e 6 mostram que não há diferenças estatísticas significativas nos dados coletados para as medidas de dureza realizadas nos corpos de prova sem tratamento térmico. Foram admitidos grau de liberdade dentro dos grupos igual a 6, entre grupos igual a 2 e nível de significância de 5% na análise de variância.

As Tabelas 7 e 8 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos com as medições da dureza realizadas nos corpos de prova com tratamento térmico e a análise de variância realizada a partir dos dados coletados.

Tabela 7: Medidas de dureza Brinell realizadas em corpos de prova com tratamento térmico de têmpera e revenido

CP	Medida 1	Medida 2	Medida 3	\bar{x}	σ^2	σ
CP1	294	301	344	313	733	15,631
CP2	294	336	294	308	588	14,000
CP3	264	327	327	306	1323	21,000

Tabela 8: Análise de variância das medidas de dureza referente aos CPs com tratamento térmico de têmpera e revenido

Teste ANOVA	
Ho: médias são estatisticamente iguais	
H1: pelo menos uma das médias é diferente	
Var_entre:	39,0000
Var_dentro:	881,33333
Var_total:	670,7500
F_calc:	0,044251
F_tab:	5,14
ANOVA_teste:	Ho aceita

Os resultados apresentados nas Tabelas 7 e 8 mostram que não há diferenças estatísticas significativas nos resultados coletados.

Por outro lado, quando são avaliadas as diferenças nos resultados, cruzando as informações dos dois grupos, é possível constatar um aumento significativo nos valores de dureza nos corpos de prova submetido ao tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento, conforme dados consolidados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Consolidação dos resultados obtidos com as medidas de dureza realizadas nos corpos de prova com e sem tratamento térmico

	\bar{x}	σ^2	n	<i>Grau de liberdade</i>
Sem tratamento térmico	192,2222	25,6944	9	16
Com tratamento térmico	309,0000	670,7500	9	

Na sequência, foi realizada a usinagem dos corpo de prova com base nos parâmetros apresentados na Tabela 4. Todas as amostras foram usinadas com pastilhas novas e idênticas, de forma a minimizar a influência de outros fatores que não fossem aqueles resultantes do tratamento térmico.

As Tabelas 10 e 11 apresentam as medidas da rugosidade média (Ra) realizadas nos corpos de prova sem tratamento térmico e análise de variância. Foram admitidos grau de liberdade dentro dos grupos igual a 6, entre grupos igual a 2 e nível de significância de 5% na análise de variância.

Tabela 10: Rugosidade média (Ra) medidas nos corpos de prova sem tratamento térmico

CP	Medida 1	Medida 2	Medida 3	\bar{x}	σ^2	σ
CP1	3,52	3,69	3,7	3,636667	0,0102	0,1012
CP2	3,79	3,81	3,86	3,82	0,0013	0,0361
CP3	3,66	3,63	3,76	3,683333	0,0046	0,0681

Tabela 11: Análise de variância das medidas de rugosidade corpos de prova sem tratamento térmico

Teste ANOVA	
Ho: médias são estatisticamente iguais	
H1: pelo menos uma das médias é diferente	
Var_entre:	0,0272
Var_dentro:	0,00539
Var_total:	0,0109
F_calc:	5,053608
F_tab:	5,14
ANOVA_teste:	Ho aceita

A partir das informações apresentadas nas Tabelas 10 e 11, constatou-se que não há diferenças estatísticas significativas na rugosidade média (Ra) medida nos corpos de prova sem tratamento térmico.

As Tabelas 12 e 13 apresentam, respectivamente, as medidas da rugosidade média (Ra) obtidas nos corpos de prova com tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento e a análise de variância realizada a partir dos dados coletados.

Tabela 12: Rugosidade média (Ra) medidas nos corpos de prova com tratamento térmico de têmpera

CP	Medida 1	Medida 2	Medida 3	\bar{x}	σ^2	σ
CP1	3,91	4,42	3,92	4,083	0,085	0,168
CP2	4,55	4,85	4,26	4,553	0,087	0,170
CP3	4,78	4,93	4,36	4,690	0,087	0,171

Tabela 13: Análise de variância das medidas de rugosidade corpos de prova com tratamento térmico

Teste ANOVA	
Ho: médias são estatisticamente iguais	
H1: pelo menos uma das médias é diferente	
Var_entre:	0,3038
Var_dentro:	0,08646
Var_total:	0,1408
F_calc:	3,514073
F_tab:	5,14
ANOVA_teste:	Ho aceita

Nota-se, da mesma forma que, no caso anterior, que não foram constatadas diferenças estatísticas significativas entre os valores medidos nos corpos de prova submetidos ao tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento.

A Tabela 14 apresenta a consolidação das medidas de rugosidade média (Ra) realizadas nos corpos de prova com e sem tratamento térmico.

Tabela 14: Consolidação dos resultados obtidos com as medidas de dureza realizadas nos corpos de prova com e sem tratamento térmico

	\bar{x}	σ^2	n	<i>Grau de liberdade</i>
Sem tratamento térmico	3,7133	0,0109	9	16
Com tratamento térmico	4,4422	0,1408	9	

O teste F (Fisher-Snedecor) realizado para verificar se as amostras apresentam variâncias comuns, pode ser observado na Tabela 15. Admitindo um nível de confiabilidade de 95%, o teste mostrou que a hipótese nula, de variâncias comuns, deve ser descartada, confirmando, dessa forma, que as amostras apresentam variâncias independentes.

Tabela 15: Teste F para análise das rugosidades de corpos de prova com e sem tratamento térmico

TESTE F	
Ho: Variâncias comum	
H1: Variâncias independentes	
F_calc:	12,97644649
F_tab:	3,179
Teste f:	Ho rejeitada

O teste t-Student para amostras com variâncias independentes, utilizado para comparar

os resultados com e sem tratamento térmico é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16: Teste t-Student para análise das rugosidades de corpos de prova com e sem tratamento térmico

TESTE "t-Student"	
Ho:	Médias comuns
H1:	Médias independentes
t _{calc} :	5,615253051
Grau _{lib} :	9
t _{tab} :	2,262
Teste "t":	Ho rejeitada

Dessa maneira, com base no teste t-Student, considerando 5% de significância e grau de liberdade igual a 9, verificou-se que a hipótese de médias comuns foi rejeitada, o que implica diferenças estatísticas significativas nos resultados.

4. DISCUSSÃO

Os corpos de prova submetidos ao tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento apresentaram piores desempenhos no critério acabamento superficial, utilizado para análise de usinabilidade do aço SAE 1045.

O aumento na rugosidade média foi de aproximadamente 20%, considerado bem significativo, o que foi confirmado por meio da análise estatística t-Student.

Embora muitos autores afirmem que o aumento na dureza e resistência mecânica do material exerçam algum benefício sobre o acabamento superficial em peças usinadas, tal fato não se confirmou com os dados experimentais levantados. Algumas hipóteses podem ser estabelecidas para justificar tal fenômeno.

A dureza do material exerce influência sobre a vida da ferramenta, conforme mencionado por Ferraresi (1977, p. 418), que apresenta a influência do tratamento térmico de beneficiamento (têmpera e revenimento) no desgaste de flanco em uma ferramenta de aço rápido. Tal desgaste, ao alcançar níveis elevados, influenciam tanto na precisão dimensional, quanto no acabamento superficial da peça usinada, o que justifica o aumento nos valores de rugosidade observados nos dados experimentais coletados.

Por outro lado, a força de corte sofre influência das propriedades do material. Diniz *et al.* (2014, p. 63) afirmam que embora não possa ser tomado como regra, a dureza exerce

influência sobre o aumento da pressão específica de corte e, por consequência, da força de corte. A elevação desta implica no aumento dos níveis de vibração do sistema máquina-ferramenta, o que resulta em piores acabamentos superficiais, corroborando os resultados alcançados.

Outrossim, como o propósito era analisar a influência da dureza sobre a rugosidade final da peça usinada, todos os experimentos foram realizados sob as mesmas condições de corte, tendo sido fixados valores de velocidade, avanço e profundidade de corte, assim como o material da ferramenta. Assim, talvez fosse possível alcançar valores de rugosidade mais próximos, caso fossem admitidos ajustes nesses parâmetros em função da elevação da dureza do material, promovida pelo tratamento térmico, o que, mais uma vez, justifica os resultados alcançados.

5. CONCLUSÃO

A análise da rugosidade realizada em um aço SAE 1045 laminado, submetido ao tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento permitiu que fossem tiradas as seguintes conclusões:

- O aumento da dureza ocasionada pelo tratamento térmico influenciou, significativamente, na rugosidade final da peça usinada;
- Os resultados obtidos por meio das medidas de rugosidade, realizadas em peças usinadas sob condições controladas, mostraram plena coerência com vasto estudo bibliográfico realizado sobre o tema.
- Embora não tenha sido o foco deste trabalho, acredita-se que a microestrutura do material submetido ao tratamento de têmpera seguido de revenimento também tenha influenciado nos resultados observados, o que pode ser foco de trabalhos futuros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, A. C.; MOURO, A. L.; CAMPOS, F. DE O. *Usinagem para engenharia: um curso de mecânica de corte*. 1ª edição. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2020.

BIASIBETTI, G. R. S.; CAVALER, L. C. C.; NUNES, R. M.; ROCHA, A. S. *Análise da rugosidade superficial de barras de aço SAE 1045 após torneamento*. Revista Matéria, v.24, n.1, 2019

COLACO, Geraldo Alves; MEDEIROS, Ithyara Dheylyle Machado de. *Análise da influência dos parâmetros de usinagem sobre a rugosidade no torneamento cilíndrico externo em corte a seco e com abundância de fluido de corte*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXXIV., 2014, Curitiba. Anais [...], São José dos Campos: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2014. p. 1-20.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 9ª edição ed. São Paulo: Artliber Editora, 2014.

FERRARESI, DINO. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

GONÇALVES, Rubens Soeiro; ARAÚJO JR, Antônio Santos; RIBEIRO, José Ribamar dos Santos; RODRIGUES, Jean Robert Pereira. *Análise da rugosidade em função do avanço e velocidade de corte com e sem o fluido de corte*. In: NATIONAL CONGRESS ON EXPERIMENTAL MECHANICS, XI., 2018, Porto. Anais [...], INEGI/FEUP, 2018. p. 623-630.

MACHADO, Á. R. et al. *Teoria da usinagem dos materiais*. 3ª edição ed. São Paulo: Blücher, 2015.

PEREIRA, V.P.; CÂMARA, M.A. *Análise da temperatura ótima de corte para o par: metal duro revestido x aço ABNT 1045*. Revista Matéria, v.26, n.3, 2021.

Data de recebimento: 01 /09 /2023.

Aceito para publicação: 30 /10/ 2023.