

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE NORMALIZAÇÃO NA USINABILIDADE DO AÇO SAE 1045

INFLUENCE OF STANDARDIZING TREATMENT ON THE SAE 1045 STEEL SAE 1045 SAE STEEL MACHINESBILITY

Prof. Me. Helio dos Santos França Junior¹, Everton Maciel Francisco Mendes², Luã dos Santos Silva³, Gilberto Rohr Bastos⁴

DOI 10.5281/zenodo.8132759

RESUMO

A qualidade final do produto é fonte de preocupação constante na indústria metal mecânica. Neste contexto, a análise de fatores que possam influenciar no acabamento superficial de peças usinadas ganha relevância, sobretudo no que tange às propriedades mecânicas dos materiais. O aço SAE 1045, amplamente utilizado na construção mecânica, foi submetido ao tratamento de térmico de normalização para que fosse avaliada a influência deste tratamento sobre a usinabilidade do material, medida através do desvio médio aritmético (Ra) da rugosidade em peças confeccionadas a partir do processo de torneamento a seco. Nestas operações 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. Também foram realizadas análises metalográficas de amostras com e sem tratamento térmico e observadas as diferenças na microestrutura do material. Desta forma, foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os resultados, o que confirma a influência do tratamento térmico de normalização sobre a usinabilidade do aço SAE 1045, assim como a coerência desses resultados com a microestrutura encontrada.

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

ABSTRACT

¹ 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

² Graduando da Fundação Técnico Educacional Souza Marques – Faculdade de Engenharia Mecânica Laboratório de Tecnologia Mecânica. E-mail: : evertonmendes.eng@gmail.com

³ Graduando da Fundação Técnico Educacional Souza Marques – Faculdade de Engenharia Mecânica – Laboratório de Tecnologia Mecânica. E-mail: gilbertorohr@yahoo.com.br

⁴ Professor Especialista da Fundação de Apoio à Escola Técnica – FAETEC – Escola Técnica Estadual República – ETER. E-mail: gilbertorohr@yahoo.com.br

The product's final quality is a constant source of concern in the metalworking industry. In this context, the analysis of factors that may influence the surface finish of machined parts becomes relevant, especially with regard to the mechanical properties of materials. The SAE 1045 steel, widely used in mechanical construction, was subjected to normalization heat treatment in order to evaluate the influence of this treatment on the machinability of the material, measured through the arithmetic mean deviation (Ra) of roughness in parts made from the dry turning process. Carbide inserts, class LT10 with submicron PVD coating, from the

manufacturer Lamina Technologies, were used in these operations, the results being tabulated and submitted to statistical treatments of analysis of variance (ANOVA) and Student's t-test. Metallographic analyzes of samples with and without heat treatment were also carried out and differences in the microstructure of the material were observed. Thus, statistically significant differences were observed between the results, which confirms the influence of the normalization heat treatment on the machinability of the SAE 1045 steel, as well as the coherence of these results with the microstructure found.

Keywords: Machinability; Analysis of Variance; Thermal treatments

1. INTRODUÇÃO

A usinabilidade pode ser entendida como sendo a facilidade com que um determinado material possui para ser removido através de um processo de corte, quando submetido a diferentes processos de usinagem.

Segundo Diniz et al., (2014, p. 151) usinabilidade pode ser definida com uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão.

Araújo (2020, p. 228) afirma que diversos fatores podem influenciar o resultado da usinabilidade de um sistema, como as características e propriedades do material de trabalho, a geometria e o material da ferramenta de corte, os parâmetros de corte e o meio no qual o corte ocorre, as condições da máquina-ferramenta e o tipo de processo de usinagem a ser realizado.

Diversos autores têm apresentado estudos sobre a influência desses fatores. Hammes et al. (2017) apresentou um estudo sobre otimização do acabamento superficial no torneamento cilíndrico externo de um aço SAE 1045 através da variação dos parâmetros de corte. Hoffmann et al (2020) estudaram a influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial e no perfil de dureza do aço AISI 316l submetido a processo de torneamento. Biasibetti et al (2019) analisaram a influência exercida pelas condições de usinagem sobre a rugosidade superficial de

barras de aço SAE 1045 após o torneamento.

Por outro lado, Ferraresi (1977, p. 569) afirma que inúmeros ensaios foram propostos por diferentes pesquisadores para julgar o comportamento do material, numa combinação de peça-ferramenta, em relação às grandezas características de usinagem, tais como: desgaste da ferramenta, força de corte, acabamento superficial, temperatura de corte.

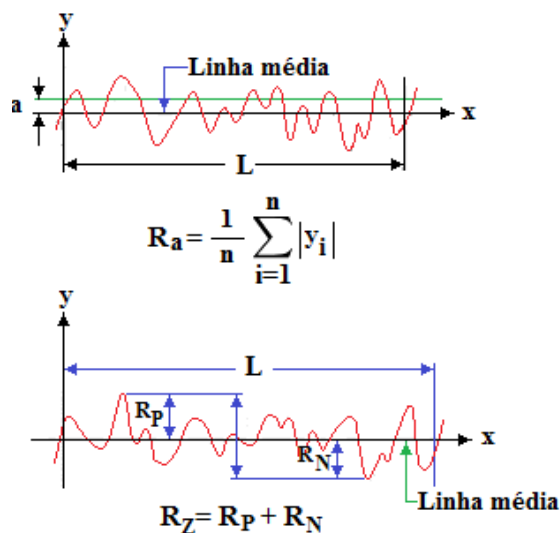
O acabamento superficial é uma das grandezas físicas do processo de usinagem que contribui basicamente na avaliação do índice de usinabilidade do metal.(FERRARESI, 1977, p.595).

A qualidade das superfícies das peças é caracterizada pelo acabamento obtido na usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas do metal na camada superficial. Desta forma, a rugosidade oriunda do processo de corte, causada pelo rastro deixado na 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).

Para a quantificação da rugosidade, foram estabelecidos parâmetros dentre os quais Ra e Rz são os mais utilizados, uma vez que representam a média dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem (desvio médio aritmético) e a soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem (altura máxima do perfil), respectivamente. (MACHADO et al., 2015, p.312).

A Figura 1 ilustra representa graficamente os parâmetros Ra e Rz.

Figura 1: Representação gráfica do dos parâmetros Ra e Rz para medidas de rugosidade superficial



Para Araújo (2020, p. 190), é possível realizar uma previsão teórica da rugosidade de superfície para operações de torneamento baseada na geometria da ferramenta e nos valores de avanço por volta. Entretanto é preciso destacar que esses valores são aproximados e não incluem a influência de outros fatores como vibrações, além de condições de lubrificação e refrigeração. Dessa forma, a partir do perfil teórico, é possível determinar os valores de R_a e R_z através das relações:

$$R_a = \frac{f^2}{31,2 \cdot r_e} \quad (1)$$

$$R_z = \frac{f^2}{8 \cdot r_e} \quad (2)$$

onde f representa o avanço por volta e r_e o raio de ponta da ferramenta.

Segundo Ferraresi (1977, p. 609), considerando-se a influência do material da peça, e fixando-se as outras variáveis, a rugosidade superficial obtida poderá servir para classificar o metal, no ponto de vista do acabamento superficial, através de um índice comparativo definido pela relação:

$$C_r = \frac{(R_z)_{teor}}{R_z} \quad (3)$$

onde $(R_z)_{teor}$ é a rugosidade máxima teórica obtida a partir do avanço por volta e do raio de ponta da ferramenta e R_z a rugosidade máxima obtida no ensaio.

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 pelo processo de usinagem, assim como variações na microestrutura do material podem impactar no resultado final.

Dessa forma, o presente tem como proposta apresentar um estudo sobre a influência do tratamento térmico de normalização sobre a usinabilidade do aço 1045, utilizando como critério de análise o acabamento superficial em corpos de prova usinados, sob condições específicas, cujos dados coletados foram compilados e tratados estatisticamente. Por outro lado, foram realizadas análises metalográficas, de forma a microestrutura servisse de parâmetro para a validação dos resultados.

2. OBJETIVOS

Comprovar a influência da microestrutura do material obtida a partir do tratamento térmico de normalização sobre a rugosidade final dos corpos de prova, confeccionados sob os

mesmos parâmetros de usinagem.

3. METODOLOGIA

O material utilizado foi o aço SAE 1045 redondo e laminado, em duas barras 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

Inicialmente, foram cortadas 6 (seis) amostras de 1 ½" de diâmetro com 140 mm de comprimento, sendo 3 (três) destinadas ao tratamento térmico.

Para o tratamento de normalização foi utilizado o forno elétrico tipo mufla, do fabricante QUIMIS, de temperatura máxima de 1200°C. O material foi aquecido até 900°C, sendo retirado do forno após 25 minutos e resfriado ao ar livre.

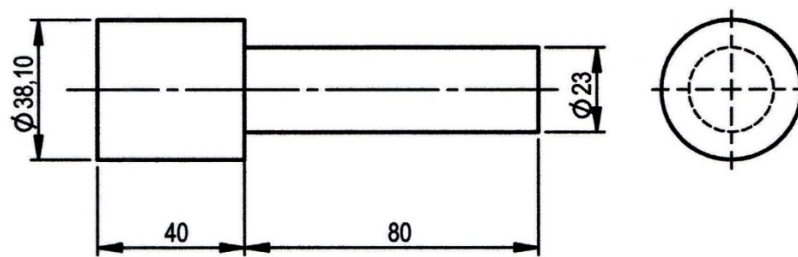
Após o tratamento todas as 06 (seis) amostras foram cortadas duas porções, uma de 20 mm e outra de 120 mm de comprimento, sendo a primeira destinada à preparação de corpos de prova para análise metalográfica e a outra parte destinada à operação de usinagem. Para o corte foi utilizada a cortadeira metalográfica marca PANTEC, modelo Pancut-40.

Para a preparação dos corpos de prova para análise metalográfica, foi utilizada a lixadeira mecânica de dois pratos, do fabricante STRUERS, modelo KNUTH Rotor, sendo as amostras polidas com a politriz de prato único, do fabricante STRUERS, com rotações de 500 e 1000 RPM.

A análise metalográfica foi realizada através do microscópio ótico da marca OLYMPUS, de aumento máximo de 1000X, com câmara de captura acoplada de 3,0 MP de resolução da marca TUCSEN.

Os corpos de provas destinados à análise de rugosidade foram pré-usinados, conforme indicado na Figura 2.

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



Os corpos de prova foram fixados à placa de três castanhas da máquina 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.

Para a realização dos ensaios de usinabilidade 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

A rugosidade da peça usinada foi medida utilizando-se um rugosímetro digital, marca INSIZE, modelo ISR-C003. Utilizou-se o parâmetro Ra com comprimento de amostragem (cut-off) de 0,8 mm. As medições foram realizadas na metade do percurso usinado, para que eventuais oscilações ocorridas durante o processo de usinagem, que influenciam na rugosidade da peça fossem desconsideradas. Desta forma, foram realizadas 3 medidas nesta porção do corpo de prova, levantadas num intervalo de 120° em torno de sua seção transversal.

Dessa forma, foram realizadas três medições em cada um dos três corpos de prova, com e sem tratamento térmico, somando um total de 09 (nove) observações, sobre as quais foram realizadas análises estatísticas (Análise de Variância e Análise t-Student) para atestar a influência do tratamento térmico sobre a rugosidade das peças usinadas.

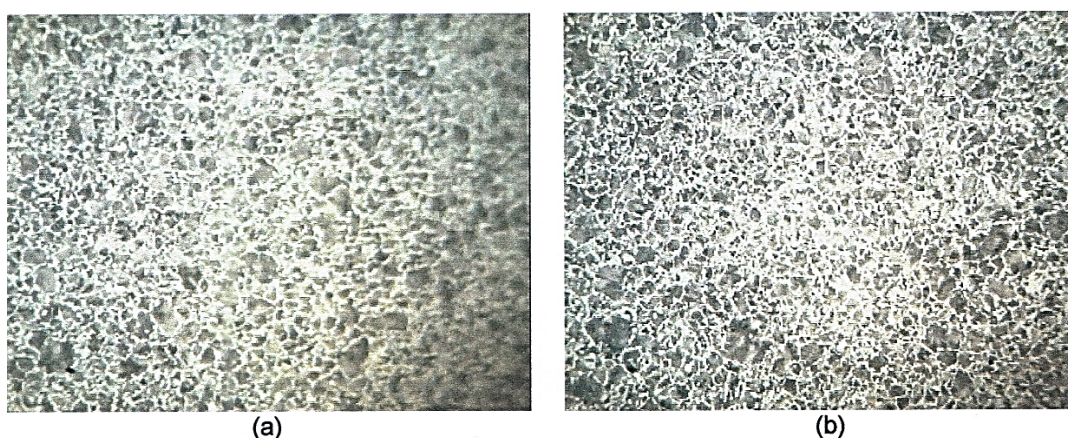
4. RESULTADOS

Embora as microestruturas de aços laminados a quente sejam similares às aquelas observadas nos aços posteriormente submetidos ao tratamento de normalização, há pequenas nuances que diferem os resultados.

A análise metalográfica possibilitou verificar que a amostra de material sem tratamento térmico de normalização apresenta grãos de tamanhos ligeiramente variados, típica de material laminado a quente, formados em decorrência da recuperação e recristalização dinâmica dos grãos alongados devido a deformação promovida pelo processo de laminação, conforme indicado na Figura 2(a).

Os corpos de prova que foram submetidos ao tratamento de normalização apresentaram uma distribuição mais homogênea dos grãos, ligeiramente menores quando comparada com o material sem tratamento térmico, característico da presença de perlita fina, normalmente observada em aços hipoeutetóides, conforme ilustrado na Figura 2(b).

Figura 2: Microestruturas de aço SAE 1045 laminados (a) sem tratamento térmico (b) com tratamento térmico de normalização. Aumento padrão de 600 vezes.



As Tabelas 4 e 5 apresentam os valores de rugosidade medidos nos corpos de prova com e sem tratamento térmico de normalização, usinados sob as mesmas condições, isto é, rotação ajustada à máquina de 2500 rpm, profundidade de corte de 0,5 mm e avanço de 0,187 mm/volta. Há de se destacar também que 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 sobre o acabamento superficial das peças.

Tabela 4: Desvio médio aritmético (Ra) medidos nos corpos de prova sem tratamento térmico

CP	Medida1	Medida2	Medida3	\bar{x}	σ^2	σ
CP1	3,52	3,69	3,70	3,637	0,010	0,101
CP2	3,79	3,81	3,86	3,820	0,001	0,036
CP3	3,66	3,63	3,76	3,683	0,005	0,068

Tabela 5: Desvio médio aritmético (Ra) medidos nos corpos de prova com tratamento térmico

CP	Medida1	Medida2	Medida3	\bar{x}	σ^2	σ
CP1	3,12	3,34	3,17	3,210	0,013	0,115
CP2	3,12	3,20	3,28	3,200	0,006	0,080
CP3	3,28	3,31	3,26	3,283	0,001	0,025

Foram realizadas análises de variância para verificar a ocorrência de diferenças estatísticas significativas nas medições realizados nos corpos de prova com e sem tratamento térmico, o que não se confirmou, conforme indicado nas Tabelas 6 e 7. Foi admitido, nestas análises, grau de liberdade dentro dos grupos igual a 6, entre grupos igual a 2 e nível de significância de 5%.

Tabela 6: Análise de variância das medidas de rugosidade corpos de prova sem tratamento térmico

Teste ANOVA	
<i>H₀: médias estatisticamente iguais</i>	
<i>H₁: pelo menos uma das médias é diferente</i>	
Variância entre grupos	0,0272
Variância dentro do grupo	0,00539
<i>F_{calculado}</i>	5,0536
<i>F_{tabelado}</i>	5,14
ANOVA teste	<i>H₀ aceita</i>

Tabela 7: Análise de variância das medidas de rugosidade corpos de prova com tratamento térmico

Teste ANOVA	
<i>H₀: médias estatisticamente iguais</i>	
<i>H₁: pelo menos uma das médias é diferente</i>	
Variância entre grupos	0,0062
Variância dentro do grupo	0,00678
<i>F_{calculado}</i>	0,9164
<i>F_{tabelado}</i>	5,14
ANOVA teste	<i>H₀ aceita</i>

A Tabela 8, apresenta a consolidação das medições dos desvios médios aritméticos (Ra)

da rugosidade, realizadas nos corpos de prova com e sem tratamento térmico de normalização.

Tabela 8: Consolidação dos desvios médios aritméticos (Ra) da rugosidade medida nos corpos de prova com e sem tratamento térmico

	\bar{x}	σ^2	n	<i>grau de liberdade</i>
Como recebido	3,7133	0,0109	9	16
Normalizados	3,2311	0,0066	9	

O teste F, realizado para verificar se as amostras apresentam variâncias comuns, pode ser observado na Tabela 9, que confirma esta hipótese, uma vez que, admitindo um nível de significância de 5%, apresentam variâncias iguais sob o ponto de vista estatístico.

Tabela 9: Teste F para análise das rugosidades de corpos de prova com e sem tratamento térmico

Teste F	
<i>H₀: variâncias comuns</i>	
<i>H₁: variâncias independentes</i>	
<i>F_{calculado}</i>	1,634993721
<i>F_{tabelado}</i>	3,44
Teste F	H₀ aceita

A análise t-Student, admitindo significância de 5% e grau de liberdade igual a 16, utilizada para comparar as médias das medições de rugosidade realizadas nos corpos de prova, atestou a influência do tratamento térmico de normalização sobre o acabamento superficial de peças usinadas, uma vez que, a partir dos dados coletados, foi possível constatar diferenças estatísticas significantes nos valores calculados para as médias, conforme indicado na Tabela 10.

Tabela 10: Teste t-Student para análise das rugosidades de corpos de prova com e sem tratamento térmico

Teste t-Student	
<i>H₀: Médias comuns</i>	
<i>H₁: Médias independentes</i>	
<i>t_{calculado}</i>	10,94011426
Grau de liberdade	16
<i>t_{tabelado}</i>	2,12
Teste t-Student	H₀ rejeitada

4. DISCUSSÃO

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

Materiais submetidos ao tratamento de normalização apresentam valores de dureza ligeiramente aumentados quando comparado com materiais recozidos. Tal fato se justifica pela microestrutura observada pós tratamento térmico de normalização, caracterizada pela formação de uma perlita mais fina, mais dura e mais resistente, devido à proximidade das camadas alternadas de ferrita e cementita ocasionadas pela menor difusão do carbono em comparação com materiais submetidos ao tratamento de recozimento. (CHIAVERINI, 2008).

Porém, a ligeira elevação da dureza não foi suficiente para influenciar no aumento da força de corte, ao ponto elevar os níveis de vibração do sistema máquina-ferramenta, de forma a impactar negativamente a rugosidade final da peça.

Por outro lado, Callister (2012, p. 317) afirma que materiais, cuja microestrutura predominante seja a perlita fina, apresentam uma redução da ductilidade.

Diniz et. al. (2014, p. 158) menciona que uma elevação da dureza e diminuição da ductilidade melhoram a usinabilidade do material, desde que esta oscile em torno de 200 HB

Conforme observado nos dados apresentados na Tabela 8, há uma ligeira, porém estatisticamente significativa redução das medidas de rugosidade, confirmada através do teste t-Student indicado na Tabela 10. Tal redução se justifica pela melhor distribuição dos grãos, com dimensões mais uniformes, proveniente do tratamento térmico de normalização podendo ser constatada na comparação das microestruturas apresentadas nas Figuras 2(a) e 2(b). Tal resultado mostra-se coerente com a bibliografia e com resultados já apresentados por diversos autores.

5. CONCLUSÕES

A análise de usinabilidade do aço 1045, submetido ao tratamento térmico de normalização, sob o critério de acabamento superficial, permitiu que fossem tiradas as seguintes conclusões:

- O tratamento térmico de normalização exerce influência sobre a usinabilidade do material;
- Os resultados obtidos através das medidas de rugosidade, realizadas em peças usinadas sob condições controladas, mostraram plena coerência com vasto estudo bibliográfico realizado sobre o tema.

- As microestruturas analisadas a partir dos ensaios metalográficos, mostraram coerência com o esperado e foram fundamentais na consolidação dos resultados.

6. REFERÊNCIAS

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.

CALLISTER, W. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 8ª edição ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, V. *Tratamento térmico das ligas metálicas*. São Paulo: Associação Brasileira da Metalurgia e Materiais, 2008.

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

DOS SANTOS BIASIBETTI, G. R. et al. Surface roughness analyses of 0.45%*c* (SAE 1045) steel bars after turning. *Revista Materia*, v. 24, n. 1, 2019.

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

HOFFMANN, P. R. et al. Influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial e no perfil de dureza no aço AISI 316L submetido ao processo de torneamento. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 12, n. 4, p. 257–268, dez. 2020.

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

MÜLLER HAMMES, J.; FERREIRA PORTO ROSA, A.; WALKER, E. Optimization of Surface Finish in Cylindrical External Turning a SAE 1045 steel. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, v. 12, n. 2, p. 138–156, 1 jun. 2017.

Data de recebimento: 09 /03 /2023. Aceito para publicação: 10 / 04/ 2023.