

EFEITO DA PENETRAÇÃO DE TRABALHO E VELOCIDADE DA PEÇA NA RUGOSIDADE DO AÇO ABNT N2711 E NA POTÊNCIA DE RETIFICAÇÃO

Marcus Vinícius de Oliveira, Universidade Federal de Uberlândia, marcus1705.mv@gmail.com

Amanda Souza Abrão, Universidade Federal de Uberlândia, amandaabrao55@gmail.com

Pietro Bedule Camara, Universidade Federal de Uberlândia, pietrocâmara.oe@ufu.br

Alcione dos Reis, Universidade Federal de Uberlândia, alcionedosreis@yahoo.com.br

Rosemar Batista da Silva, Universidade Federal de Uberlândia, rosemar.silva@ufu.br

Resumo. A retificação é um processo de usinagem por abrasão utilizado no estágio final de fabricação de uma peça para proporcionar acabamento final e redução das irregularidades superficiais. Porém, uma das suas características é a alta energia específica gerada que é transformada em calor, principalmente ao usar rebolo convencional, que é pobre condutor de calor, podendo comprometer a funcionalidade da peça. Uma forma de amenizar este problema é ajustar corretamente os parâmetros de corte, principalmente a penetração de trabalho e velocidade da peça, pois afetam a espessura equivalente de corte, que por sua vez afeta o acabamento. Nesse sentido, o presente trabalho possui como objetivo avaliar a influência da penetração de trabalho e da velocidade da peça na rugosidade do aço ABNT N2711 (empregado na fabricação de moldes e matrizes) e na potência de retificação. Os parâmetros de entrada testados foram a penetração de trabalho (15 μm e 30 μm) e a velocidade da peça (2,7 m/min e 7,5 m/min). As variáveis de saída analisadas foram a rugosidade R_a e R_z e a potência elétrica. Os resultados mostraram que os parâmetros de rugosidade R_a e R_z praticamente não foram afetados pela penetração de trabalho, mas aumentou 19,3 % com a velocidade da peça. A potência elétrica aumentou cerca de 32 % ao empregar a combinação entre maior penetração de trabalho e maior velocidade da peça.

Palavras-chave: retificação, aço ABNT N2711, penetração de trabalho, velocidade da peça, rugosidade e potência.

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão em que a remoção de material ocorre por meio de partículas abrasivas de geometria não definida presentes no rebolo e que rotaciona a velocidades superiores a 30 m/s (Alves, 2007; Groover, 2014). Em geral, a retificação é um dos processos de usinagem muito utilizado na fabricação de componentes mecânicos para conferir a combinação entre elevada qualidade dimensional (qualidade de trabalho IT06 - IT03) e geométrica, principalmente com rugosidade R_a no intervalo de 0,2 μm - 1,6 μm . Isso é possível devido à utilização de baixos valores de penetração de trabalho (em escala de micrometros), à pequena dimensão dos utilizados em relação às arestas de corte das ferramentas de geometria definida (Diniz, 2010).

Nos dias atuais há uma busca pelo aumento da produtividade nos processos, de forma que torna-se necessário, em alguns casos, a utilização de maiores valores para os parâmetros de corte utilizados na retificação, como a penetração de trabalho e velocidade da peça. Entretanto, uma consequência disso é o aumento da energia necessária para o funcionamento deste processo, o que implica em maior geração de calor (King e Hahn, 2012), a qual grande parte é direcionada a peça, podendo gerar danos térmicos. Dessa forma, elevar os valores dos parâmetros de corte por um lado pode aumentar a produtividade, mas por outro pode afetar negativamente a integridade da superfície usinada (Barini *et al.*, 2021). Esses danos térmicos, que geralmente podem ser observados nas peças submetidas à retificação, são normalmente a alteração da dureza superficial e abaixo da superfície retificada, trincas, tensão residual de tração, queima da peça (Malkin e Guo, 2008).

Nesse sentido, uma maneira de minimizar esses danos térmicos seria com a correta seleção dos parâmetros de corte e que varia de par peça-rebolo, principalmente. Sendo assim, este estudo tem como objetivo avaliar a influência da penetração de trabalho (a_e) e velocidade da peça (v_w) nos parâmetros de rugosidade R_a e R_z , e de potência elétrica consumida na retificação plana tangencial do aço ABNT N2711 utilizando do rebolo de óxido de alumínio branco (Al_2O_3).

2. METODOLOGIA

A retificação foi realizada em uma retificadora plana tangencial do fabricante MELLO, modelo P-36, semiautomática, com rotação constante em 2400 rpm, potência nominal do motor que aciona o eixo-árvore de 2,25 kW e resolução de 5 μm no eixo Z (vertical). O rebolo utilizado nos ensaios foi de óxido de alumínio branco, especificação AA46K8V, com dimensões de 254 mm (diâmetro externo), 25,4 mm (largura) e 76 mm (diâmetro interno). O material retificado foi o aço ABNT N2711, o mesmo material utilizado no trabalho desenvolvido por Hübner *et al.* (2020), com geometria retangular com 17 mm (altura), 21 mm (largura) e 48 mm (comprimento). Este material é empregado na fabricação de moldes e matrizes sendo utilizado para texturização e polimento espelhado, além de ter alta resistência à compressão. Ele é recomendado em situações que deseja-se maior resistência mecânica e ao desgaste. Por outro lado, em sua composição é

encontrado grande quantidade de carbonetos primários de ferro, tornando um aço de baixa usinabilidade (Aço especial, 2023). Ele também é um material muito suscetível à queima de retífica, esta foi a razão de sua seleção para este trabalho. O fluido de corte utilizado foi o óleo semissintético de base vegetal VASCO 7000, da fabricante Blaser Swissslube, preparado na proporção de 1 parte de óleo para 19 partes de água e aplicado à uma vazão de 7,14 L/min pelo método de aplicação convencional (abundância). Por meio de um refratômetro N1, ATAGO, a concentração do fluido de corte foi monitorada após cada ensaio, considerando o BRIX de aproximadamente 3,6 %. Para a dressagem do rebolo, foi utilizado um dressador de diamante do tipo ponta única com penetração de dressagem (a_d) de 30 μm , grau de recobrimento do rebolo (U_d) de 3 e velocidade de dressagem (V_d) de 140 mm/min. O ciclo de dressagem compreendeu 3 passes pelo rebolo.

Em relação aos parâmetros de corte utilizados nos ensaios, profundidade de corte (a_p) e a velocidade de corte (V_s) foram mantidas constantes e iguais a 21 mm e 32,15 m/s, respectivamente. Conforme apresentado na Tabela (1), foram controlados os níveis de penetração de trabalho (a_e) e de velocidade da peça (v_w).

Tabela 1 - Plano experimental elaborado para os ensaios de retificação

Ensaio	a_p (mm)	a_e (μm)	v_w (m/min)
1	21	15	2,7
2			7,5
3		30	2,7
4			7,5

Após a preparação da superfície e definição dos parâmetros de usinagem, foram realizados os ensaios de retificação, de passagem. Nas Figura 1 (a), (b) e (c) o setup do processo de retificação, a amostra de N2711 fixada na morsa para ser retificada e a montagem do sistema de medição da rugosidade das amostras, respectivamente.

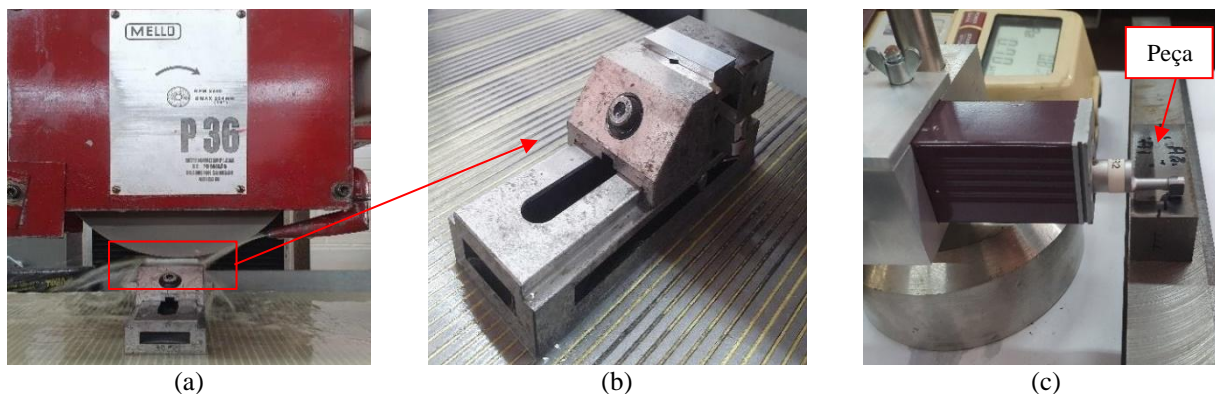


Figura 1 - a) Setup do experimento de retificação; b) detalhe da amostra fixada na morsa; c) Procedimento da medição de rugosidade

As variáveis de saída analisadas nos ensaios de retificação foram os valores de rugosidade da peça e a potência elétrica do processo. Os parâmetros de rugosidade analisados foram os parâmetros R_a (Desvio aritmético médio de rugosidade) e R_z (Altura máxima do perfil). Para a medição dos parâmetros de rugosidade foi utilizado o rugosímetro portátil modelo SJ-201P, Mitutoyou com um cut-off (comprimento de amostragem) de 0,8 mm e comprimento de avaliação igual a 5,0 mm. Para cada condição testada foram feitas três medições de rugosidade perpendiculares às marcas de avanço do rebolo. A potência elétrica foi monitorada em tempo real por meio da interação entre a tensão e a corrente elétrica, mensuradas separadamente no motor acionador do eixo-árvore da retificadora. A aquisição de dados foi realizada, inicialmente, em um conversor analógico. Em seguida, os dados foram tratados no software LABVIEW.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados de rugosidade e de potência elétrica.

3.1 Rugosidade

Na Figura (2) são apresentados os resultados obtidos da rugosidade R_a e R_z medidos após os ensaios de retificação plana tangencial do aço ABNT N2711 em função da penetração de trabalho (a_e) e da velocidade da peça (v_w).

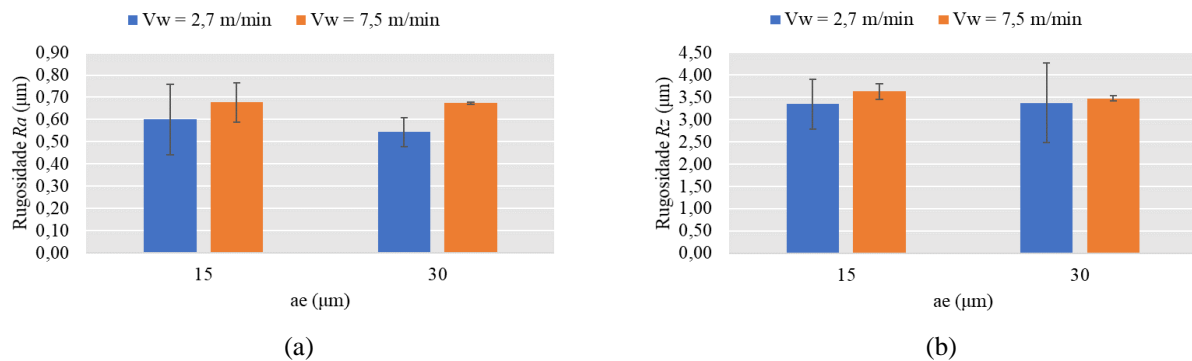


Figura 2 - Rugosidade média do aço N2711 em função da variação de penetração de trabalho (a_e) e velocidade da peça (v_w): (a) valores de rugosidade R_a (μm); (b) valores de rugosidade R_z (μm)

Das Figuras (2) (a) e (b) pode ser observado que os valores de rugosidade não foram sensíveis a variação da penetração de trabalho. Isso pode ser atribuído à pequena diferença na faixa de valores de penetração de trabalho utilizada. Quanto à velocidade da peça (v_w), em geral a rugosidade (R_a e R_z) aumentou com a velocidade da peça. Ao aumentar este parâmetro há aumento na taxa de remoção de material específica (Q'_w), ocasionando maiores espessuras de cavaco não deformado (h_{cu}) e de espessura de corte equivalente (h_{eq}), que por sua vez eleva as forças de corte, piora as condições tribológicas e afeta negativamente no acabamento, o que implica em maiores valores de rugosidade (Klocke, 2009). Comportamento similar foi obtido no estudo realizado por Ulbricht *et al.* (2020), no qual os menores valores de rugosidade foram obtidos com menor v_w na retificação plana tangencial do aço ferramenta SAE ABNT D6 (Villares VC131), com rebolos convencionais de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) e Carbetto de Silício (SiC).

É importante destacar neste trabalho, que todos os valores do parâmetro R_a situaram-se abaixo de $0,8 \mu m$, o que é 50 % menor em relação ao valor de referência, como limite superior de R_a que é $1,6 \mu m$ para superfícies retificadas em condições de semi-acabamento (Diniz *et al.*, 2010). Embora os valores de rugosidade ficaram abaixo de $0,8 \mu m$, para melhor avaliação dos outros parâmetros de integridade de superfície da peça, seria necessário medir a tensão residual, dureza abaixo da superfície e realizar a análise da superfície usinada com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura e assim poder tirar mais conclusões sobre a retificabilidade deste material nas condições investigadas.

3.2 Potência Elétrica

Nas Figuras (3) (a) e (b) são apresentadas as curvas de potência elétrica monitoradas durante a retificação do aço N2711 com velocidades da peça de 2,7 m/min e 7,5 m/min, respectivamente, para a penetração de trabalho constante igual a $15 \mu m$. Na Figura (3) (a) observa-se que a potência atingiu um pico em torno de 950 W, enquanto que na Fig. (3) (b), em que são apresentados os valores após a retificação com o maior valor de $v_w = 7,5$ m/min, o pico de potência é de aproximadamente 1150 W, 21 % maior em relação aos valores observados quando a $v_w = 2,7$ m/min, Fig. (3) (a). No momento em que há o retorno do rebolo (sentido de corte concordante), também denominado por spark-out, esse aumento é em torno de 12 %.

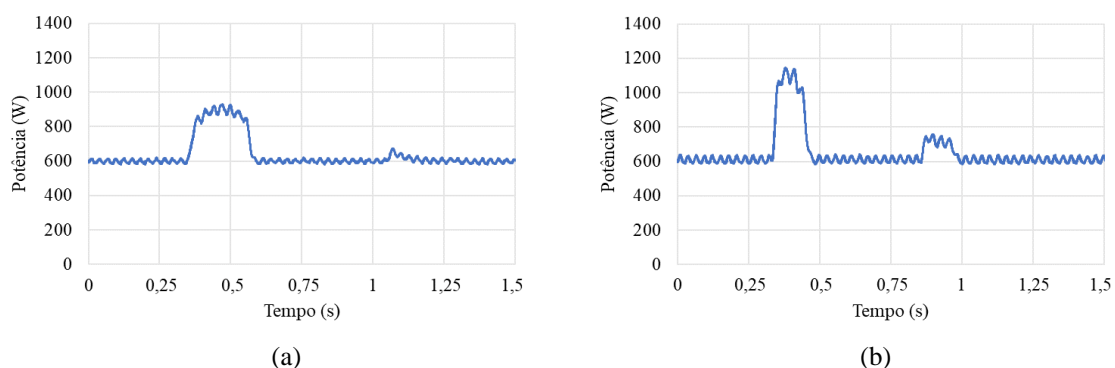


Figura 3 - Potência elétrica (W) do aço ABNT N2711 ao longo do tempo (s): (a) $a_e = 15 \mu m$ e $v_w = 2,7$ m/min; (b) $a_e = 15 \mu m$ e $v_w = 7,5$ m/min

Já nas Figuras (4) (a) e (b) estão mostradas as curvas de potência elétrica que foram obtidas sobre as mesmas variações de v_w , porém, com a_e constante igual a $30 \mu m$. Observa-se que o comportamento da potência se assemelha aquele da Figura (3) (a) e (b), em que há aumento dos picos de potência, chegando a 980 W e 1250 W, quando se emprega a combinação entre o maior valor de v_w com $a_e = 30 \mu m$, para $v_w = 2,7$ m/min e 7,5 m/min, respectivamente. Os valores de

potência aumentaram 28 % em relação aos valores observados quando a $v_w = 2,7$ m/min, Fig. (4) (a). No sentido concordante (spark-out), esse aumento é de 11 %.

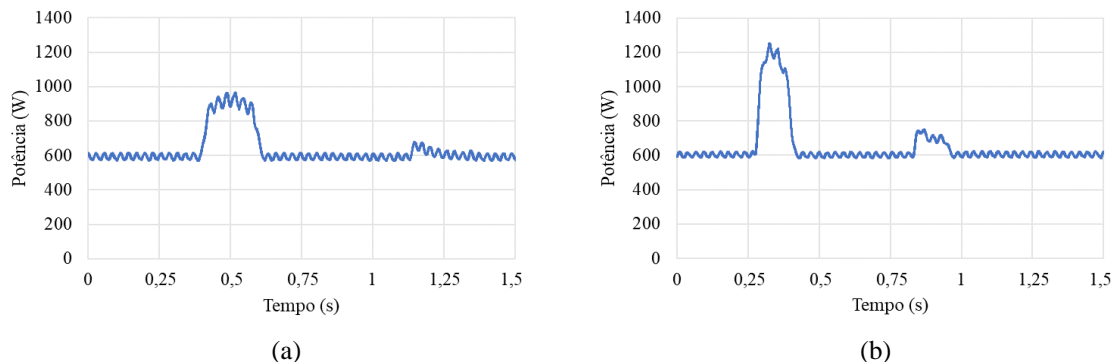


Figura 4 - Potência elétrica (W) do aço ABNT N2711M ao longo do tempo (s): (a) $a_e = 30 \mu\text{m}$ e $v_w = 2,7$ m/min; (b) $a_e = 30 \mu\text{m}$ e $v_w = 7,5$ m/min

Comparando-se os picos de potência durante a usinagem no sentido de corte discordante observados entre os gráficos das Figuras (3) e (4), (a) e (b), o efeito da a_e (de $15 \mu\text{m}$ para $30 \mu\text{m}$) praticamente não resultou em aumentos significativos na potência elétrica consumida durante a retificação. O mesmo efeito também foi encontrado no spark-out.

Além disso, pode ser observado nos gráficos com a combinação de maior penetração de trabalho ($a_e = 30 \mu\text{m}$) e velocidade da peça ($v_w = 7,5$ m/min) ocasionaram em maiores valores na potência, cerca de 32 % maior em relação ao resultado em que foi utilizado menor a_e e v_w , pois tanto a_e quanto v_w influenciam diretamente sobre a taxa de remoção de material (Q_w) e a espessura equivalente de corte (h_{eq}), o que demanda maiores esforços de corte para remoção de um volume maior de material. Resultado semelhante foi encontrado por Da Silva *et al.* (2018) ao realizarem ensaios de retificação plana tangencial de um aço ABNT N2711 com fluido de corte semissintético de base vegetal VASCO 7000, com rebolos de óxido de alumínio (Al_2O_3), condições idênticas aquelas empregadas neste trabalho, mas variando a_e ($15 \mu\text{m}$ e $50 \mu\text{m}$) e v_w (2,4 m/min e 5 m/min). Segundo os autores, a área de contato entre o material da peça e o rebolo aumenta com a penetração de trabalho causando aumento das forças de corte normal e tangencial, exigindo assim maior potência para a formação do cavaco. Dessa forma, fica evidente que a potência elétrica sofre influência direta dos parâmetros de retificação selecionados, sendo a velocidade da peça o fator de maior influência neste trabalho.

Considerando os resultados obtidos para o aço ABNT N2711, entende-se que a combinação da menor penetração de trabalho ($15 \mu\text{m}$) com a menor velocidade da peça (2,7 m/min) proporciona melhores condições econômicas de usinagem, visto que a potência obtida foi menor nesses casos. Entretanto, nas condições em que são necessárias melhores condições de acabamento, seria recomendado utilizar a combinação entre a maior velocidade da peça (7,5 m/min) e o maior valor da penetração de trabalho ($30 \mu\text{m}$).

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados experimentais obtidos com a retificação plana tangencial do aço ABNT N2711 sob diferentes condições de corte, as seguintes conclusões foram obtidas:

- O aumento da penetração de trabalho resultou na diminuição dos valores médios de rugosidade R_a e R_z , sendo que para a rugosidade R_a , a diminuição foi cerca de 9,4 % para velocidade de 2,7 m/min e 0,5 % para velocidade de 7,5 m/min.
- O aumento da velocidade da peça gerou superfícies com maiores valores médios de rugosidade R_a e R_z , sendo um aumento de cerca de 11,3 % para penetração de trabalho igual a $15 \mu\text{m}$ e 19,3 % para penetração de trabalho igual a $30 \mu\text{m}$, considerando a rugosidade R_a . Para rugosidade R_z , o aumento foi de 7,8 % e 3 % para as penetrações de trabalho de $15 \mu\text{m}$ e $30 \mu\text{m}$, respectivamente.
- A utilização de maiores valores de penetração de trabalho e maiores velocidades da peça, gerou um aumento da potência elétrica utilizada pelo processo, sendo este aumento de aproximadamente 32 %.

5. REFERÊNCIAS

- Aço especial, 2023, “Aço 2711”, 16 Ago. 2023, <<https://www.acoespecial.com.br/aco-2711>>.
- Alves, M. C. S., 2007, “Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN”, Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru, p. 155.

- Barini, B.S., Lins, R.S., Marques, V.A.S., Guimarães, C., Marques, A. e Fernandes, L.A., 2021, “Análise dos parâmetros de corte sobre a rugosidade ra na retificação cilíndrica externa de passagem axial”, *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 6, p. 64133-64140.
- Da Silva, R.B., Ferreira, F.I., Baptista, F.G., De Aguiar, P.R., Ruzzi, R.S., Hubner, H.B., Fonseca, M.P.C. e Bianchi, E.C., 2018, “Electromechanical impedance (EMI) technique as alternative to monitor workpiece surface damages after the grinding operation”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 98, p. 2429-2438.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C. e Coppini, L.L., 2010, “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”, 7ª ed., São Paulo: Art. Liber, p. 268.
- Groover, M.P., 2014, “Introdução aos processos de fabricação”, Rio de Janeiro: LTC Livros técnicos e científicos editora SA, 737 p.
- Hübner, H.B., da Silva, R.B., Duarte, M.A.V. e Bianchi, E.C., 2020, “Avaliação da integridade superficial do aço N2711 após retificação com rebolo de óxido de alumínio”, Henrique Ajuz Holzmänn; João Dallamuta. (Org.), *A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Mecânica 2*, 1ª ed., Ponta Grossa - PR: Atena Editora, p. 8-14.
- King, R.I., e Hahn, R.S., 2012, “Handbook of modern grinding technology”, Springer Science & Business Media.
- Klocke, F., 2009. *Manufacturing processes 2*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Malkin, S., Guo. C., 2008, “Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives”, 2ª ed., New York: Industrial Press, 372p.
- Ulbricht, G., Moura, C.R., Carlini, G.C., Mehl, W.C. e Souza, G.C., 2020, “Análise da influência da velocidade da peça sobre a rugosidade no processo de retificação plana tangencial”, *Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, p. 1-9.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Code de Finança 001) pelo apoio financeiro, como também à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e aos Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e Laboratório de Usinagem Convencional (LUC), ambos da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC). Três autores agradecem ainda ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU pela bolsa de estudos. Eles agradecem à Blaser® Swissslube e Saint-Gobain® Abrasivos por fornecer o fluido de corte e o rebolo, respectivamente. Rosemar Batista da Silva agradece ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Pesquisa processo n: 312274/2022-0, à FAPEMIG - EDITAL 002/2018 - Programa Pesquisador Mineiro, PPM XII - Processo n.: PPM-00492-18.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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