

ESTUDO DA USINABILIDADE DOS POLÍMEROS TERMOPLÁSTICO NYLON 6 E DO TERMORRÍGIDO CELERON NA MANUFATURA INTEGRADA POR COMPUTADOR - CIM

TOTI, F. A.

*Faculdade de Tecnologia de Sorocaba - Coordenadoria do Curso de Projetos Mecânicos
francisco.toti01@fatec.sp.gov.br*

*Study of the Machinability of Polyamide Nylon 6 Thermoplastic Polymers and Celeron Phenolic Thermosetting
in Computer Integrated Manufacturing – CIM*

Eixo Tecnológico: Produção industrial

Resumo

Os setores acadêmico e industrial buscam o desenvolvimento e aplicação de materiais que atendam às necessidades de projeto, considerando também o processo de fabricação, custos e o impacto no meio ambiente de determinado produto. Nesse contexto, é crescente a utilização de polímeros na fabricação de elementos de máquinas e quando submetidos ao processo de remoção de material, usualmente são utilizados parâmetros e ferramentas de corte disponíveis para os metais. De acordo com o tipo de matriz, estrutura química, tipos de reforço e processo de fabricação desses materiais, a geração de calor pela usinagem pode elevar a temperatura do processo até e ultrapassar a temperatura de transição vítrea (Tg) ou de degradação do material, podendo incidir na integridade superficial usinada. Sendo assim, a usinabilidade é uma tarefa difícil de ser determinada, pois depende das propriedades do material que refletem na performance de usinagem. O objetivo dessa etapa do projeto é o estudo teórico-experimental da usinabilidade e o comportamento térmico dos polímeros poliamida termoplástico nylon 6 e do termorrígido celeron, submetidos aos processos de fresamento e de torneamento, sob condição a seco pela manufatura integrada por computador (CIM). Através de simulações foi definida a programação para a usinagem, sendo que o celeron apresentou melhores resultados da usinabilidade quanto a rugosidade média (Ra) nos fresamentos tangencial e frontal sob condição a seco em comparação ao nylon 6 com os mesmos parâmetros de corte, tal como ocorreu no processo de furação. Quando comparados os valores da Ra entre os fresamentos, os obtidos do frontal são melhores em relação ao tangencial para os dois polímeros. No entanto, a influência dos dois fresamentos na Tg do nylon foi considerada insignificante, apresentando uma diferença inferior a 3 °C, entre as amostras obtidas dos cavacos no ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC).

Palavras-chave: *Usinabilidade, Rugosidade, Polímero, Simulação, CIM.*

Abstract

The academic and industrial sectors seek the development and application of materials that meet project needs, also considering the manufacturing process, costs and the impact on the environment of a given product. In this context, the use of polymers in the manufacture of machine elements is increasing and when subjected to the material removal process, parameters and cutting tools available for metals are usually used. According to the type of matrix, chemical structure, types of reinforcement and manufacturing process of these materials, the generation of heat by machining can raise the temperature of the process up to and exceed the temperature of glass transition (Tg) or degradation of the material, which may affect the machined surface integrity. Therefore, machinability is a difficult task to determine, as it depends on the material properties that reflect on the machining performance. The objective of this stage of the project is the theoretical-experimental study of the machinability and thermal behavior of the thermoplastic polyamide nylon 6 polymers and the thermosetting celeron, submitted to milling and turning processes, under dry conditions by computer-integrated manufacturing (CIM). Through simulations, the programming for machining was defined, wherein the celeron showed better machinability results in terms of average roughness (Ra) in tangential and face milling under dry condition compared to nylon 6 with the same cutting parameters, as occurred in the drilling process. When comparing the Ra values between the millings, those obtained from the frontal are better in relation to the tangential one for both polymers. However, the influence of the two milling processes on the nylon Tg was considered insignificant, with a difference of less than 3 °C between the samples obtained from the chips in the differential scanning calorimetry (DSC) test.

Key-words: *Machinability, Roughness, Polymer, Simulation, CIM.*

1. Introdução

A maioria dos elementos fabricados de máquinas passam em maior ou menor grau pelo processo de remoção de material, sendo que os processos de fresamento e torneamento são etapas que antecedem a furação e dependendo da qualidade requerida pelo projeto pode ocasionar a rejeição e o seu descarte. Aliado a isso, é crescente a utilização de materiais que atendam às necessidades de projeto, considerando também o processo de fabricação, custos e o impacto no meio ambiente causado pelo processo de determinado produto. Nesse contexto, devido à grande variação e a alta utilização do plástico pelas indústrias, surge a necessidade de usinagem destes materiais, quer seja para reposição de peças unitárias ou poucas unidades até produções seriadas de grandes volumes [1].

Na usinagem desses materiais, usualmente são utilizados parâmetros e ferramentas de corte disponíveis para os metais, como o alumínio, adaptando condições de resfriamento para garantir a integridade do produto usinado. No mercado de ferramentas de corte não existem ferramentas específicas para usinagem de polímeros sendo a principal dificuldade nesse caso o controle do cavaco [2]. Apesar do bom domínio dos parâmetros de corte para a usinagem dos metais, sabe-se que poucas pesquisas abordam a influência deles sobre a usinabilidade dos polímeros de engenharia [3]. A usinabilidade pode ser definida como o grau de dificuldade em se usinar determinado material, sendo esta relativa a uma ou de outra característica tomada como parâmetro para o material a ser trabalhado [4].

No caso da usinagem de diferentes polímeros e alguns critérios de qualificação do processo, como rugosidade da superfície, forças de corte, potência de corte e taxa de remoção de material o aumento na velocidade de corte leva a uma melhora na rugosidade da superfície [5]. Na usinagem de polímero termoplástico utilizando e comparando dados experimentais, apresentaram resultados em que a geometria da ferramenta e os parâmetros do processo podem ser otimizados para melhorar a integridade da superfície usinada [6]. No entanto, a propriedade viscoelástica da matriz termoplástica afeta sua usinabilidade de forma diferente dos compósitos de matriz termorrígida [7]. Outro tópico que interfere no tempo de produção e na qualidade da usinagem é o tipo de cavaco que dependendo da matriz polimérica têm influência direta.

Na literatura, técnicas destrutivas e não destrutivas são utilizadas para obter informações quantitativas e qualitativas do polímero usinado que auxiliem no estudo no seu controle de qualidade na indústria. Assim, torna-se fundamental avaliar a usinabilidade dos polímeros nos processos de fresamento e torneamento que antecedem o processo de furação. O presente projeto de continuidade têm como objetivo nessa etapa o estudo teórico-experimental da usinabilidade, dos polímeros poliamida termoplástico nylon 6 e do termorrígido celeron, submetidos aos processos de fresamento e torneamento, sob condição a seco pela manufatura integrada por computador (CIM).

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

As principais características dos dois polímeros utilizados nesse trabalho são apresentados a seguir:

- polímero termoplástico poliamida (Nylon 6): produzido pelos processos de extrusão, obtendo uma estrutura semicristalina, uniforme e livre de tensões internas. Na temperatura ambiente é

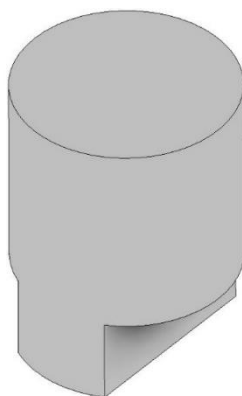
sólido, e, quando aquecido, pode atingir a temperatura de transição vítrea (T_g), passando para o estado viscoso e chegar até a temperatura de fusão (T_f). Quando resfriado à temperatura ambiente, se solidifica novamente e pode ser reconsolidado. Utilizado na fabricação de buchas para mancais, polias, guias de máquinas, engrenagens, etc. principais aplicações: engrenagens, esteiras de alimentação, mancais, buchas, guias roldanas de impacto, cames e calços [8]

- polímero termorrígido fenólico Celeron: laminado industrial com reforço de tecido (malha fina) de algodão e resina fenólica, produzido através de um processo em que após aplicação simultânea de pressão e calor às camadas ocorre a polimerização (reação química), formando, assim, uma massa rígida permanente; não pode ser termo-formado (reconsolidado) posteriormente. Usualmente aplicado na fabricação de buchas para mancais, polias, guias de máquinas, engrenagens, etc. O Celeron, é usado também para fins estruturais onde as exigências mecânicas são maiores do que as elétricas [9]

2.2. Metodologia

Dos tarugos de $\varnothing 38$ mm foram extraídos os corpos de prova para os ensaios físicos de fresamentos frontal e tangencial para os dois polímeros. A Fig. 1 exibe o modelo 3D do corpo de prova gerado no *software* CAD Inventor da Autodesk, versão educacional 2021, para posterior integração com o CAE e o CAM.

Fig. 1 - Modelo 3D para os fresamentos tangencial e frontal.



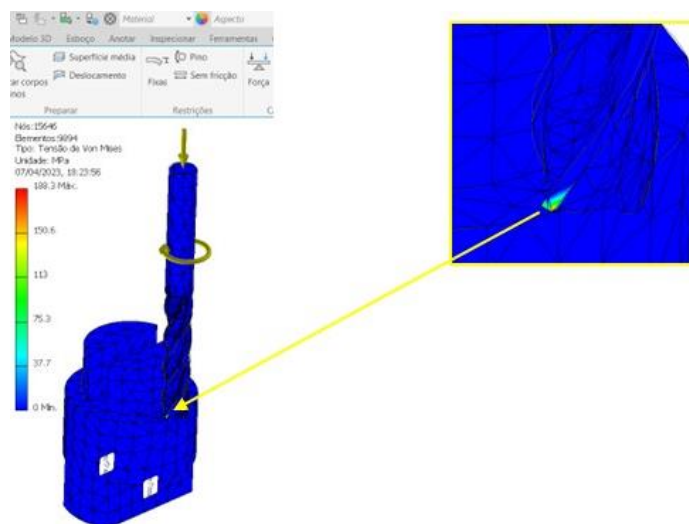
Fonte: Elaboração própria.

Nas simulações envolvendo a manufatura assistida por computador e a engenharia assistida por computador (CAM/CAE), os fresamentos tangencial e frontal utilizaram o modelo 3D da ferramenta de corte de $\varnothing 8$ mm, com quatro dentes e propriedades mecânicas do aço rápido, tal como foi utilizada nos ensaios físicos. O Modelo 3D foi importado do endereço: <https://www.mcmaster.com/products/turning-tools/> com extensão IGES e convertido para o arquivo ipt. Nas simulações e nos ensaios físicos Nos ensaios físicos dos fresamentos tangencial e frontal foi utilizada o modelo 3D e, com avanço por dente de 0,012 mm e velocidade de corte de 19m/min sob condição de resfriamento não forçado a seco.

A Figura 2 exibe a simulação na tecnologia CAE de fresamento tangencial em que o gradiente na cor azul indica que a rigidez do corpo de prova e da ferramenta de corte não são alteradas. No detalhe é exibido o gradiente na cor vermelha, indicando o aumento da tensão na

aresta de corte da ferramenta e na superfície do material devido à pressão específica de corte. Conforme o ensaio de resistência mecânica fornece tensões específicas para cada tipo de material independente da área, a pressão exercida sobre a ferramenta de corte também deve se comportar do mesmo modo [10].

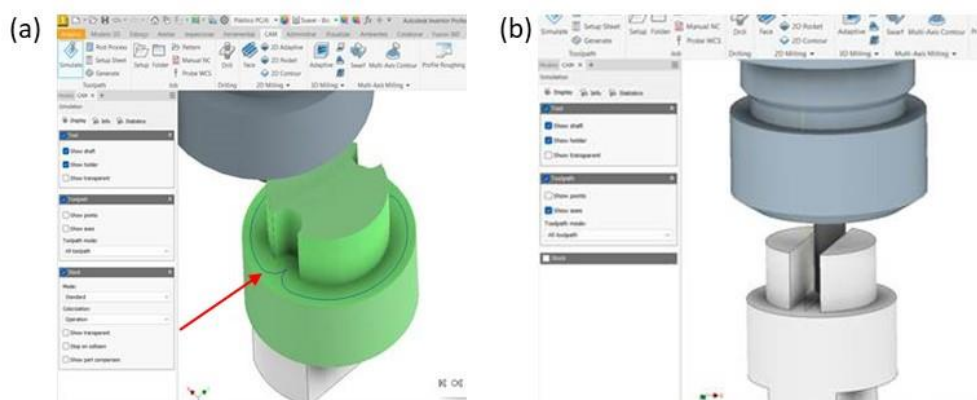
Fig. 2 – Simulação CAE do fresamento frontal.



Fonte: Elaboração própria.

A Fig. 3 mostra as simulações de fresamentos dos dois polímeros com as tecnologias CAD/CAM. A Fig. 3a mostra a trajetória (linha azul indicada pela seta) definida da ferramenta de corte no ensaio do fresamento tangencial. Outras trajetórias foram simuladas visando auxiliar a redução das rebarbas na finalização do fresamento frontal. A Fig. 3b ilustra a trajetória da ferramenta de corte dentro do canal no fresamento frontal.

Fig. 3 – Simulação CAM dos fresamentos: (a) tangencial e (b) frontal.



Fonte: Elaboração própria

Nos ensaios de usinagem foram realizadas três séries para os fresamentos tangencial e frontal para cada polímero, totalizando 12 séries, no laboratório de usinagem avançada, da Faculdade

de tecnologia de Sorocaba, na máquina-ferramenta CNC Enco Concept Mill 55, com torre porta-ferramentas com 8 posições, rotação de 150 a 3500 rpm, velocidade de avanço de 0 a 2000 mm/min.

As medições foram realizadas em equipamento DSC25 (TA Instruments, EUA), equipado com sistema de refrigeração RCS 90. As amostras do nylon 6 foram aquecidas até 250°C a partir da temperatura ambiente e depois resfriadas de volta a 40°C a uma taxa de 10°C/min. As amostras do celeron foram aquecidas até 200°C a partir da temperatura ambiente e depois resfriadas novamente a 40°C a uma taxa de 10°C/min. Todas as medições foram realizadas sob fluxo de nitrogênio de 250 mL/min e as massas das amostras foram de cerca de 2-4mg colocadas em uma panela hermética de alumínio. Todos os eventos térmicos apresentados foram identificados e calculados pelo software TRIOS®.

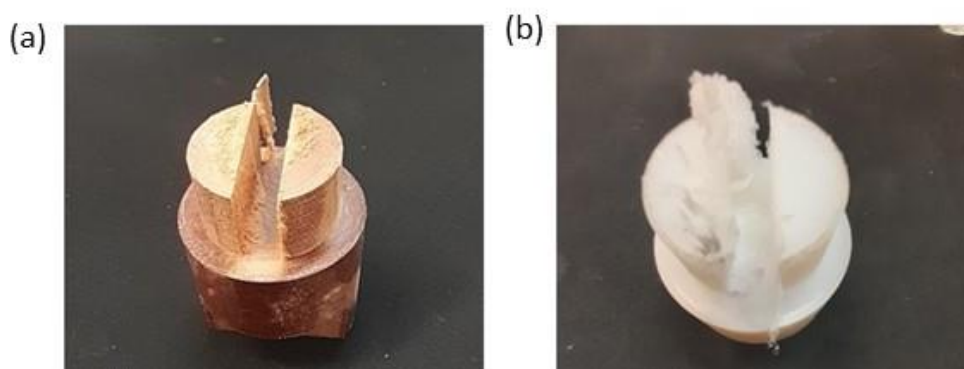
Os ensaios físicos dos torneamentos interno e externo serão executados no mês de setembro conforme planejado no cronograma dessa etapa final do presente projeto.

3. Resultados e Discussão

A Fig. 4 mostra os corpos de prova usinados dos polímeros celeron e nylon 6. Verifica-se na Fig. 4a para o polímero celeron rebarbas na saída do canal executado pelo fresamento frontal. A Fig. 4b mostra as rebarbas em maior excesso ao longo da superfície lateral do canal para nylon 6 em comparação ao celeron. No entanto, no fresamento tangencial os dois polímeros não apresentaram rebarbas. Esse comportamento do polímero nylon 6 em relação ao excesso de rebarbas pode ser atribuído a sua matriz termoplástica ser mais suscetível ao calor gerado pelo atrito das arestas de corte da ferramenta com o material.

O celeron além de ser composto de matriz termorrígida e reforçado com malha fina de algodão, ou seja, é considerado um compósito. A propriedade viscoelástica da matriz termoplástica afeta sua usinabilidade de forma diferente dos compósitos de matriz termorrígida [7]. O calor gerado em torno das arestas da ferramenta pode elevar a temperatura do processo, podendo ocorrer a redução da estabilidade da matriz e produzir danos térmicos [11].

Fig. 4 - corpo de prova usinado: (a) polímero celeron e (b) polímero nylon 6.

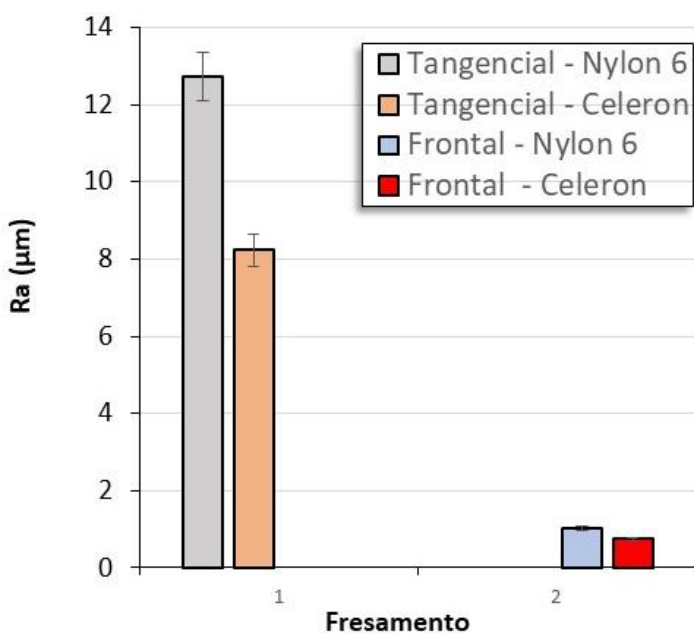


Fonte: Elaboração própria.

A Fig. 5 exibe os valores obtidos da rugosidade média (Ra) dos fresamentos tangencial e frontal. Os valores da Ra do fresamento frontal obtidos da superfície inferior do canal são próximos e melhores em relação aos valores do fresamento tangencial para os dois polímeros

conforme ilustra a Fig. 5. No entanto, quando comparados os valores da Ra obtidos do fresamento tangencial entre os dois polímeros, verifica-se que o celeron apresentou o melhor resultado, tal como apresentou no processo de furação. Esse resultado da Ra do nylon 6 está em concordância com trabalho anterior sobre fresamento de polímero termoplástico [11]. Quando comparados os valores da Ra entre os fresamentos, os obtidos do frontal são melhores em relação ao tangencial para os dois polímeros.

Fig. 5 – Valores da Ra obtidos dos fresamentos frontal e tangencial para os polímeros termoplástico nylon 6 e termorrígido celeron.



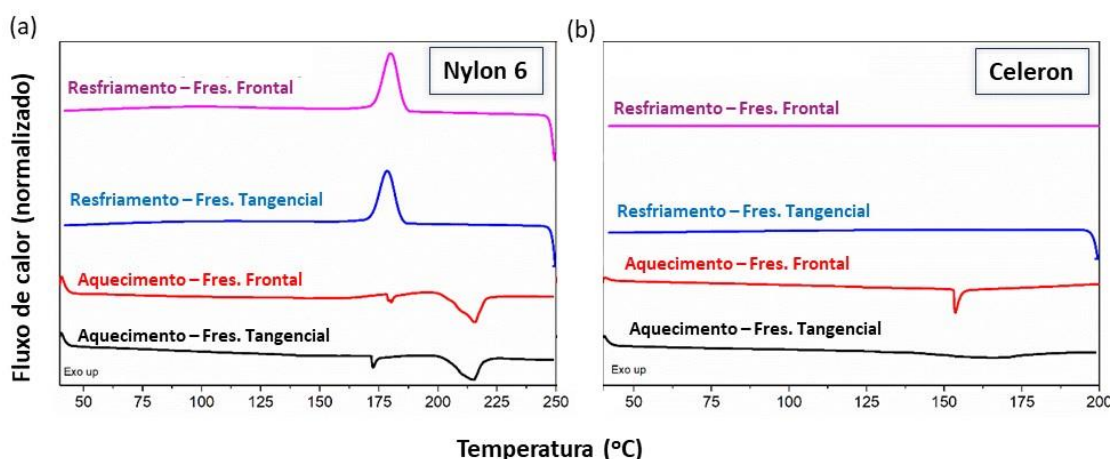
Fonte: Elaboração própria

A Fig. 6 exibe as curvas de aquecimento e resfriamento e informações obtidas pela técnica de calorimetria exploratório diferencial (DSC) das amostras dos cavacos dos fresamentos tangencial e frontal para os dois polímeros. Nota-se na Fig. 6a para o nylon 6 a presença de picos endotérmicos principais, um na região de 172-180 °C e outro na região de 215 °C, sugerindo a presença de duas fases cristalinas diferentes, sendo α mais estável termodinamicamente e γ metaestável, conforme relatado na literatura [12]. Verifica-se também a ausência de um segundo pico exotérmico na curva de resfriamento que pode estar relacionado com o aparecimento da fase γ durante os fresamentos tangencial e frontal. Outro ponto a destacar é a influência dos dois fresamentos na Tg do nylon 6, a qual pode ser considerada insignificante, apresentando uma diferença inferior a 3 °C entre o tangencial com o frontal.

A Fig. 6b apresenta as curvas de aquecimento e resfriamento do celeron e observa-se a ausência de pico exotérmico em ambas as curvas de resfriamento dos fresamentos tangencial e frontal, podendo estar relacionado à reação de cura das resinas de fenol-formaldeído [13]. No entanto, nota-se um pico endotérmico acentuado no fresamento frontal e um pico amplo para a para o fresamento frontal, na região de cerca de 150-160 °C, o que pode estar relacionado a um processo de cura, já observado a 130 °C.

Sua cinética sob análise DSC não foi totalmente compreendida, mas a ausência de pico de cristalização no resfriamento em ambas as amostras do cavaco, pode estar relacionada a um processo de cura que poderia estar ocorrendo ou a possibilidade de alterações estruturais decorrentes do processo de fresamento. No entanto estudo deve ser aprofundado sobre as informações obtidas do ensaio de DSC dos cavacos para os dois polímeros.

Fig. 6 - Amostras de nylon 6 (a) e celeron (b) durante exploratórias de aquecimento (curvas pretas e vermelhas) e resfriamento (curvas azuis e rosa), realizadas por DSC..



Fonte: Elaboração própria

4. Considerações finais

Com o computador auxiliando a manufatura no estudo teórico-experimental da usinabilidade e a análise do comportamento térmico dos polímeros nylon 6 e do celeron, submetidos ao processo de fresamentos tangencial e frontal, as seguintes conclusões foram obtidas:

- com a aplicação das tecnologias CAD/CAE/CAM através de simulações e no auxílio dos ensaios físicos pode-se ampliar o estudo na melhoria do processo quanto a trajetória da ferramenta de corte, bem como, dos valores das forças de avanço e torque calculados conforme literatura.

- em termos de usinabilidade quanto ao acabamento superficial o polímero celeron apresentou melhores resultados da rugosidade média (Ra) em relação ao nylon 6 nos fresamentos tangencial, esse sendo mais expressivo e, do frontal tal qual observado no processo de furação. Aliado a isso, as rebarbas também são mais expressivas na superfície lateral do canal para o nylon 6 em comparação ao celeron, necessitando o processo de rebarbação.

- quanto ao comportamento térmico dos dois polímeros obtidos das amostras dos cavacos, estudos devem ser direcionados e aprofundados em outra etapa do trabalho.

Cabe ressaltar que o projeto está em andamento e que esses resultados obtidos também serão comparados com os resultados dos torneamentos interno e externo, finalizando assim, a proposta de avaliar a usinabilidade dos polímeros nylon 6 e celeron através dos principais processos por remoção de material, sendo a furação, fresamento e torneamento.

Agradecimentos

A autor agradece ao Centro Paula Souza por prover o regime de jorna integral – RJI.

Referências

- [1] PEREIRA, L. E. R. Estudo da Usinabilidade dos Plásticos de Engenharia: Polieteretercetona – PEEK, Polióxido de metileno – POM, Politetrafluoretileno – PTFE e Polietileno de ultra alto peso molecular – PEUAPM. **Tese** (Doutorado em engenharia mecânica), Universidade Estadual Paulista, Bauru, p. 180, 2021.
- [2] VANAT, K. J.; BRAGHINI Jr. A. Uso de ferramentas de metal duro no torneamento do Nylon. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 50-57, 2014. Disponível em: <https://bit.ly/3CWJZs>. Acesso em out. 2022.
- [3] DIAS DA COSTA, D.; ATHAYDE, J. N.; ALENCAR, S. A. Avaliação da usinabilidade do polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE). **9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, COBEF, Joinville, Santa Catarina, 2017.
- [4] DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, L. C. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. 9ª edição, Editora Artliber, 2009.
- [5] CHABBI, A.; YALLESE, M. A.; NOUIOUA, M. et al. Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POMC) based on RSM, ANN, and DF methods. **International journal of advanced manufacturing technology**, v. 91, p. 2267-2290, 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3CDJ4HM>. Acesso em out. 2022.
- [6] ADENIJI, D.; SCHOOP, J.; GUNAWARDENA, S. et al. Characterization and modeling of surface roughness and burr formation in slot milling of polycarbonate. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 4, p. 59, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-4494/4/2/59>. Acesso em out. 2022.
- [7] LOPEZ-ARRAIZA, A.; AMENABAR, I.; AGIRREGOMEZKORTA, A.; SARRIONANDIA, M.; AURREKOETXEA, J. Experimental analysis of drilling damage in carbon-fiber reinforced thermoplastic laminates manufactured by resin transfer molding. **Journal of Composite Materials**, vol. 46, p. 717–725, 2011.
- [8] VICK. **Boletim técnico** 2013: Nylon 6.0, corte e usinagem. Disponível em: <https://bit.ly/3TkqqM0>. Acesso em 28 fev. 2022.
- [9] <https://isolaplast.com.br/produto/celeron/>. Acesso em: 3 de mar. 2022).
- [10] KRONEMBERG, M. Machining science application: Theory and practice for operation and development of machining processes. London: **Pergamon Press**, 1966
- [11] KHASHABA, U. A. Delamination in drilling GFR-thermoset composites. **Composites Structures**, v. 63, p. 313-327, 2004.
- [12] MURTHY, N. S. Metastable crystalline phases in nylon 6. **Polym. Commun**, vol. 32(10), p. 301-305, 1991.
- [13] CHRISTIANSEN, A. W. e GOLLOB, L. Differential scanning calorimetry of phenol–formaldehyde resols. **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 30, 2279-2289, 1985.
- [14] SANTOS, W. N.; GREGORIO FILHO, R.; MUMMERY, P. et al. Propriedades térmicas de polímeros por métodos transientes de troca de calor. **Seção Técnica Polímeros**, 2003. Disponível em <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000400011>. Acesso em out. 2022.