



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## **USINAGEM DE MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZANDO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COM AR GELADO**

**Diogo Maciel, diogo@grupomaciel.com.br**  
**Carlos Henrique Lauro, caiquelauro@gmail.com**  
**Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufs.br**

Universidade Federal de São João del Rei - Praça Frei Orlando, 170 - Centro,

***Resumo:** Atualmente o cotidiano do ser humano é influenciado em maior ou menor grau pelos vários tipos de materiais desenvolvidos. Entre os principais materiais utilizados pelo homem estão os polímeros que vêm ocupando espaço entre outros materiais devido suas características na produção. As principais variáveis que podemos considerar são: preço, resistência a abrasão/degradação em meios corrosivos e flexibilidade de produção. Nesse trabalho foi estudada a usinabilidade de 3 tipos de polímeros utilizando duas velocidades de corte e três avanços com utilização de ar gelado como sistema de refrigeração em comparação a usinagem a seco e com fluido de corte emulsificável. Foi considerada como variável de resposta a rugosidade. Conclui-se que o sistema de ar gelado não se apresentou como uma boa alternativa para o resfriamento durante a usinagem e que os valores de rugosidade foram mais influenciados pelo avanço, assim como ocorre com os materiais metálicos.*

***Palavras-chave:** Usinagem de Polímeros; Sistema de ar gelado; Velocidade de corte, Rugosidade.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Os polímeros estão presentes no dia-a-dia das empresas e das pessoas sob a forma dos mais variados produtos. Comercialmente conhecidos como plásticos, estes estão distribuídos em diversos formatos e ocupam em algumas vezes lugar de destaque no cenário industrial. Não existe um dispositivo industrial que não tenha em menor ou maior escala componentes plásticos. Siglas como PVC, POLIPROPILENO, POLIETILENO, POLICARBONATO, NYLON, CELERON, FENOLITE entre outras já fazem parte do vocabulário das empresas e substituem diversos componentes industriais antes fabricados em aço ou outros metais nobres como Alumínio, Cobre, Bronze etc.

De forma geral os plásticos são produzidos por diversos processos de fabricação onde dentre eles podemos citar alguns como extrusão, injeção, sopro, termoformagem, laminação, fundição. Entretanto, estes processos somente são aplicáveis para grandes escalas de produção como componentes de automóveis (painéis, coberturas frontais e traseiras, fechamento de portas, etc). Para a produção de componentes em pequena escala, os plásticos são em grande maioria fornecidos em barras redondas e prismáticas e precisam ser trabalhados da mesma forma que os materiais metálicos. A base de dados para a produção de produtos plásticos em grande escala, como os produtos injetados, apresenta muitas fontes de referência e diversos trabalhos na área fornecendo um grande número de informações. Porém, quando se relaciona a usinagem de plásticos essas fontes são escassas e/ou limitadas e apresentam referências mínimas devido ao foco das pesquisas e das empresas estar na usinagem de materiais metálicos.

Todos os plásticos de engenharia podem ser facilmente fresados, cortados, furados, retificados e polidos todas as operações realizadas nos materiais metálicos podem ser realizadas com maior ou menor grau de dificuldade. Geralmente, as ferramentas de usinagem empregadas na fabricação de produtos plásticos apresentam geometrias idênticas às ferramentas na usinagem de materiais não ferrosos, pois não existem desenvolvimentos tecnológicos específicos para ferramentas de usinagem de materiais plásticos. De acordo com Stopplásticos (2009) estes processos são utilizados para confecção de qualquer tamanho de peça, entretanto, quantitativamente a usinagem de produtos plásticos é limitada a quantidade, pois para grandes escalas de produção aplica-se o processo de injeção. O fato dos plásticos serem mais macios do que os metais, não significa que são fáceis de usar, pois o aumento dos esforços de corte poderá causar no plástico, a ruptura da peça ou reter grandes tensões residuais internas assim como ocorre nos materiais metálicos.

Muito similar a usinagem dos metais, os fatores que influenciam na qualidade da superfície usinada podem ser divididos em duas categorias; a primeira inclui as máquinas e as variáveis ambientais como a temperatura de estabilidade, isolamento de vibrações, tensão de escoamento dos materiais que governam as medidas de macro escala estes efeitos tem sido amplamente estudados em detalhes desde o início da década de 1980 por diversos pesquisadores (Donaldson & Patterson, 1983; DeBra, 1994; Donaldson & Maddux, 1984; Franse, 1990). O segundo grupo está

associado com a geometria da ferramenta como os ângulos de folga e saída, raio de ponta, profundidade de corte, velocidade de corte que estão mais ligados a fenomenologia do processo de usinagem. Considerando o perfeito acabamento que se deseja nestes produtos, a influência destes fatores sobre a rugosidade de um polímero foi estudada por autores como Kobayashi (1967) e Jiang et al. (2000). Pode-se observar que os fenômenos recorrentes na usinagem destes produtos são similares a usinagem dos materiais metálicos.

Os estudos realizados na usinagem de produtos poliméricos têm a mesma relação da usinagem dos metais. Apesar de apresentarem resistência ao corte menor que os metais alguns plásticos apresentam, em alguns casos, abrasividade superior aos materiais metálicos provocando rápidos desgastes nas ferramentas de corte. Materiais compósitos como os plásticos reforçados com fibra de carbono apresentam diferença significativa dos materiais metálicos. Autores como Bhatnagaretal (1995), Sakuma & Seto (1983) realizaram experimentos com este tipo de material medindo a resistência ao corte, a rugosidade e usinabilidade destes materiais. Os experimentos demonstraram que nestes materiais específicos a orientação das fibras influencia fortemente na rugosidade, principalmente quando o corte é orientado no sentido da tensão das fibras onde se observaram os menores valores de rugosidade e uma alta taxa de desgaste quando o corte é orientado no sentido oposto. Porém em alguns casos pode-se observar comportamento da rugosidade similar ao dos metais onde o aumento do avanço proporcionou um aumento da rugosidade e diminuiu de forma satisfatória com o aumento da velocidade de corte (Palanikumara et al. 2008).

Devido às temperaturas geradas no torneamento, pode-se considerar que o endurecimento superficial pode variar como no caso da usinagem do TEXTOLITE, realizado por Erenkov et al. (2008), onde a dureza superficial foi reduzida na usinagem de formas complexas, sendo que no torneamento este fenômeno ocorreu devido a alta recuperação elástica que estes materiais apresentam. Já para materiais como o CAPROLON e FLUOROPLASTIC-4 a dureza superficial aumentou um pouco, mas não de forma significativa para afetar o material quando submetido a cargas mecânicas.

Esse trabalho apresenta um estudo do torneamento de três materiais poliméricos com o objetivo de definir os melhores parâmetros de usinagem para cada material. Além disso, propõem estudar a possibilidade da utilização de um sistema de ar gelado no resfriamento do processo, em substituição ao tradicional fluido de corte emulsionável, procurando assim, minimizar os efeitos nocivos ao ambiente que fluidos de corte tradicionais ocasionam.

## 2. METODOLOGIA

Foram confeccionados corpos de prova de POM (Poliacetal Homopolímero), NYLON 6 (Poliamida 6), PP (Polipropileno Homo e Comopímero). O equipamento utilizado no torneamento foi um torno CNC modelo BNC 2260X da marca SINITRON. As dimensões dos corpos de prova eram de 50 mm de comprimento por 35 mm de diâmetro conforme Fig. (1). Foram usadas duas velocidades de corte 200m/min e 250m/min com três avanços 0,04mm/rot.; 0,1mm/rot e 0,15mm/rot na usinagem de cada polímero baseado apenas nas indicações das tabelas dos fabricantes de ferramentas para materiais metálicos não ferrosos.

Todos os corpos de prova foram usinados com a mesma profundidade de corte de 2,0 mm. Os comprimentos usinados foram 25 mm com fixação de 25 mm evitando-se assim, que fosse empregado o contra ponto rotativo para que o mesmo não influenciasse nos resultados considerando o efeito da vibração. Após cada usinagem foi medida a rugosidade nos parâmetros Ra e Rz com cut-off de 0,25, respectivamente utilizando um rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ 401. Os corpos de prova foram medidos em 0°, 120° e 240° para que se pudesse ter uma média da rugosidade em todo o diâmetro, porém apenas uma medida de rugosidade no centro da cada região usinada foi realizada devido ao comprimento usinado não permitir que o apalpador do rugosímetro se deslocasse realizando duas medidas. Em todos os experimentos foram usados 3 corpos de prova. Como sistemas de resfriamento foram utilizados o óleo de corte emulsionável como composição 20:1 que é tradicionalmente utilizado nas empresas do setor de usinagem e como comparação foi empregado um sistema de ar gelado que utiliza o princípio do vortex para gelar o ar na saída do sistema.



Figura 1. Detalhe dos corpos de prova de NYLON e POM

A Figura (2) mostra o funcionamento do sistema de ar gelado, basicamente o sistema utiliza o princípio do vórtice que funciona da seguinte forma; o ar comprimido entra na câmara circular (com estado P) passando pelo bocal de entrada e desenvolvendo um fluxo axissimétrico no formato de um vórtice. Do estado (P) para o estado (I) o ar comprimido se expande e acelera sob a influência da força centrífuga de inércia o ar injetado é pressionado contra as paredes do tubo. Próximo à parede do tubo o fluxo do ar tem o formato de uma hélice sendo direcionado para a saída tangencial na forma de ar quente. Do estado (I) para o (H) o ar é aquecido por dissipação (fricção), especialmente próximo à parede do tubo, onde o gradiente de velocidade é altíssimo. O ar frio é formado pela expansão radial na linha central do tubo vórtice. O fluxo de ar frio que sai na saída (C) provoca uma linha de ar frio no formato de uma hélice com a temperatura normalmente muito inferior a temperatura de entrada do ar em (P), conforme a Fig. (2) (Brandão, 2006). A Figura (3) mostra um detalhe da montagem do sistema de ar gelado utilizado durante os experimentos.

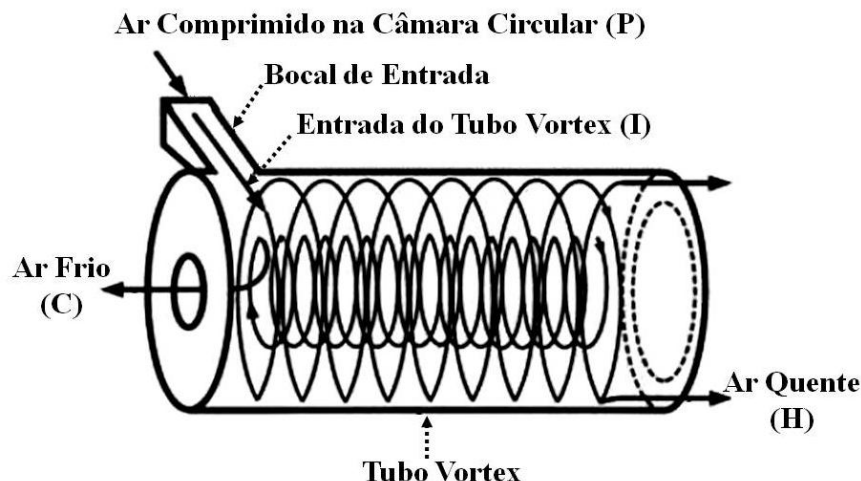


Figura 2. Princípio de funcionamento do tubo vórtice (adaptado de Fröhlingdorf e Unger, 1999).



Figura 3. Detalhe do set-up do experimento utilizando o sistema de ar gelado

A Tabela (1) mostra as características dos materiais usinados nos experimentos de torneamento. O Nylon 6 é um termoplástico obtido a partir da poliamida cujas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas, permitem variadas aplicações. Pode ser usado em substituição aos metais considerando leveza, baixo coeficiente de atrito, isolamento elétrica, boa resistência à fadiga e a agentes químicos. Entre as principais aplicações podemos citar; engrenagens, roscas sem-fim, roldanas, polias, buchas, anéis de vedação, gaxetas, roletes, chapas de desgastes, placas deslizantes, canecas e caçambas transportadoras.

O POM é um plástico rígido de engenharia com excepcional estabilidade dimensional e excelente resistência ao escoamento e à fadiga por vibrações, baixo coeficiente de atrito, elevada resistência à abrasão e a agentes químicos. Sua aplicação industrial está direcionada para peças de alta precisão, peças estruturais de pequeno porte, guias de barramento para máquinas operatrizes, mancais, buchas, acoplamento, engrenagens, vedações, arruelas, roscas sem-fim, luvas, guias, flanges, roletes, conexões, roldanas, parafusos, isoladores, retentores, elementos de válvulas.

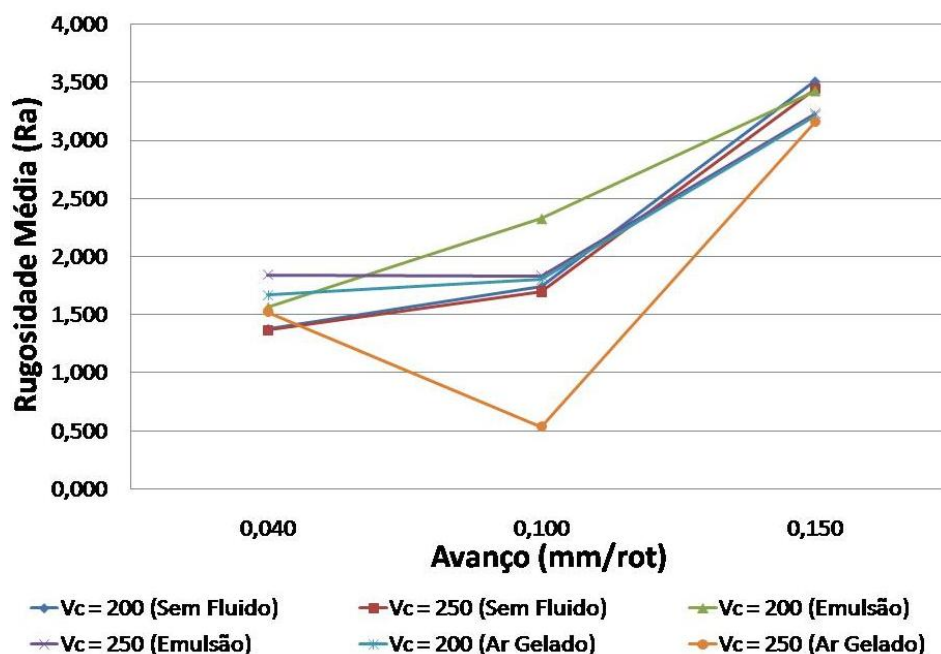
Finalmente, o PP enquadra-se entre os termoplásticos de menor peso específico ( $0,91 \text{ g/cm}^3$ ) e maior resistência química. Impermeável a líquidos e gases, não reage com a grande maioria de agentes químicos industriais e farmacêuticos. Apresenta mínima absorção de água o que lhe concede boa estabilidade dimensional. Sua aplicação está ligada a tanques de produtos químicos, tubulações de produtos químicos, conexões e válvulas, aparelhos ortopédicos, rotores e roscas sem-fim (Incomplast, 2010)

**Tabela 1. Propriedades dos materiais poliméricos utilizados nos experimentos**

Propriedades Físicas e Mecânicas	Nylon	POM	PP
Peso específico	$1,14 \text{ g/cm}^3$	$1,41 \text{ g/cm}^3$	$0,91 \text{ g/cm}^3$
Calor específico a $23 \text{ }^\circ\text{C}$	$1,7 \text{ J/}^\circ\text{K.g}$	$1,5 \text{ J/}^\circ\text{K.g}$	$1,7 \text{ J/}^\circ\text{K.g}$
Condutividade térmica a $23 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,23 \text{ W/}^\circ\text{K.m}$	$0,30 \text{ W/}^\circ\text{K.m}$	$0,25 \text{ W/}^\circ\text{K.m}$
Temperatura máxima/mínima	$+100/-40 \text{ }^\circ\text{C}$	$+100/-30 \text{ }^\circ\text{C}$	$+100/-10 \text{ }^\circ\text{C}$
Tensão de ruptura à compressão	90 MPa	100 MPa	60 MPa
Módulo de elasticidade à tração	3000 MPa	2900 MPa	1100 MPa
Elongação até ruptura	60 %	40 %	600 %
Dureza Rockwell (ASTM D 785)	R100	R120	R64
Coefficiente de atrito p/ aço refiticado e polido com resina a seco	0,42/0,38	0,32/0,32	0,30/0,30

### 3. ANALISE DOS RESULTADOS

As Figuras (4), (5) e (6) mostram os gráficos típicos dos resultados de rugosidade encontrados após a usinagem dos corpos de prova de Nylon, PP e PO, respectivamente. Nota-se uma tendência nos resultados da usinagem do Nylon, conforme Fig. (4), onde um aumento da rugosidade média ocorreu proporcional ao aumento do avanço, considerando as duas velocidades de corte empregadas e com os três sistemas de resfriamento. Nota-se também que, ocorreu apenas uma pequena variação desta tendência no avanço de  $0,10 \text{ mm/rot}$  com velocidade corte de  $250 \text{ m/min}$  e utilizando-se o sistema de ar gelado o valor de rugosidade apresentou um pequeno decréscimo.



**Figura 4. Rugosidade Ra para o Nylon**

Para o POM a mesma tendência pode ser observada, pois nota-se na Fig. (5) que o comportamento da rugosidade também foi crescente seguindo a mesma tendência do aumento do avanço. Porém, para este material não ocorreu o comportamento de uma brusca redução da rugosidade para o avanço de  $0,10 \text{ mm/rot}$  como ocorreu no NYLON. Nota-se que, da mesma forma como ocorreu com o Nylon, o POM demonstrou uma tendência do aumento da rugosidade mais significativa, acentuando-se para o valor de avanço de  $0,25 \text{ mm/rot}$ .

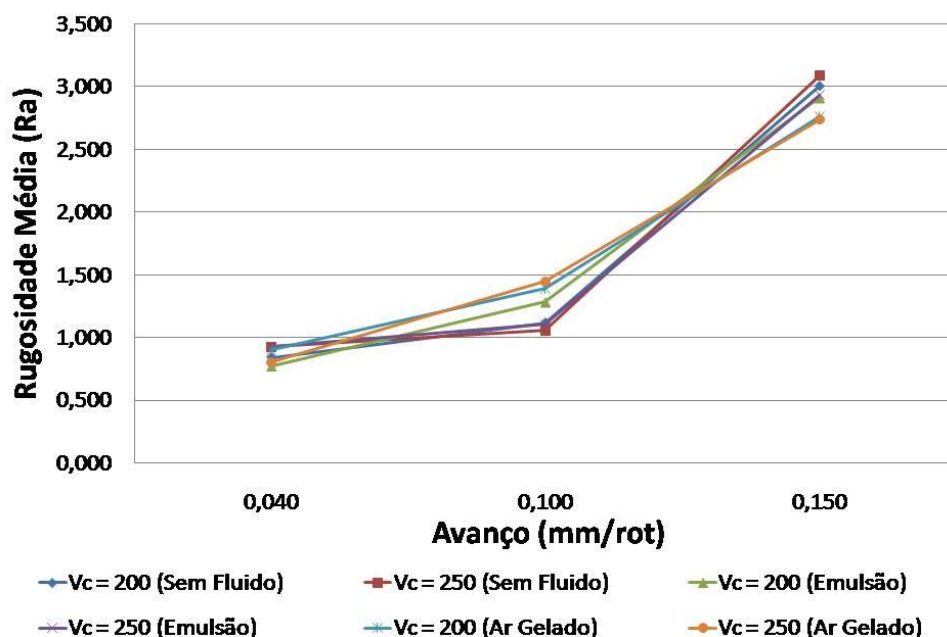


Figura 5. Rugosidade Ra para o POM.

A Figura (6) mostra o resultado da rugosidade Ra para o PP, onde da mesma forma que pode ser observado para os materiais anteriores ocorreu um aumento do valor de rugosidade com o aumento do valor de avanço. Entretanto, para este material nota-se que os valores de rugosidade Ra para os avanços de 0,04 e 0,1 mm/rot podem ser considerados dentro da mesma faixa de valores, pois nota-se que não ocorreu uma variação significativa com alguns valores apresentando uma tendência de crescimento e outros valores apresentando uma tendência de queda. Dessa forma, na usinagem do PP nenhuma previsão do comportamento da rugosidade pode ser feita com precisão.

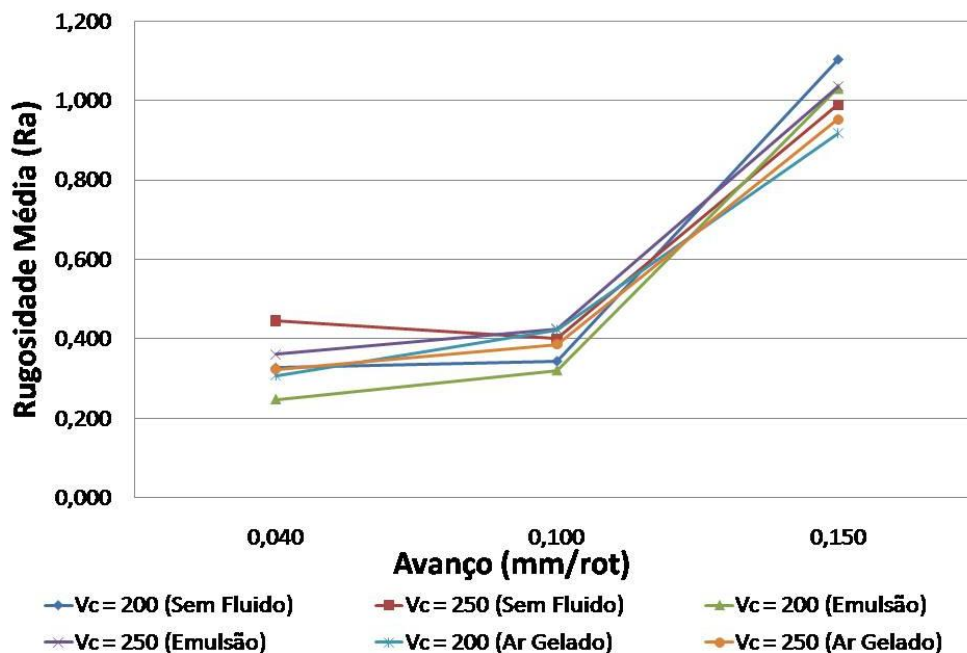
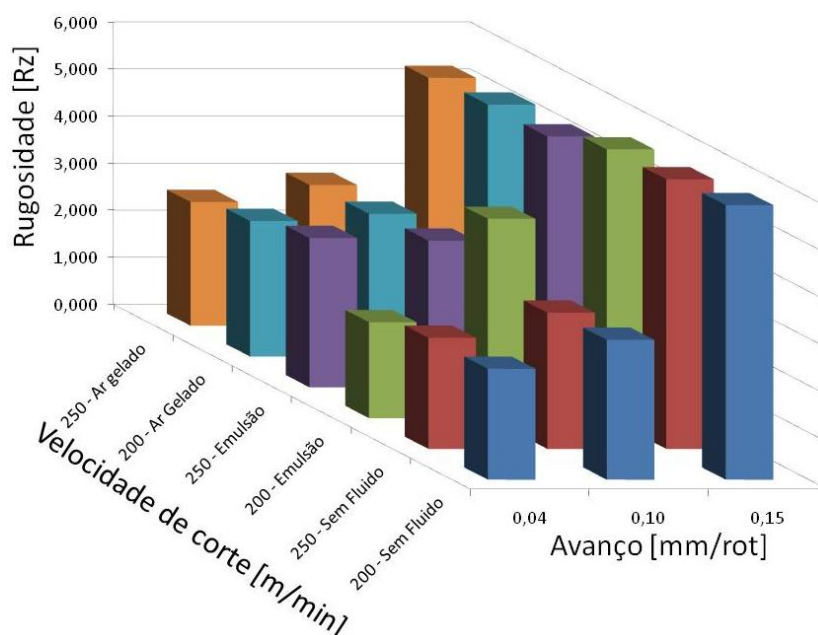


Figura 6. Rugosidade Ra para o PP

A Figura (7) mostra um resumo dos valores de rugosidade Rz onde pode ser considerado que o mesmo comportamento aconteceu com os valores de Rugosidade Ra. Alguns valores de rugosidade apresentaram uma tendência a uma linearização com no caso dos valores de rugosidade Rz para a velocidade de 200 m/min com emulsão na usinagem do NYLON e no caso da velocidade de corte de 250 m/min sem fluido de corte para a usinagem do PP. Isso demonstra que não existe um tipo único de sistema lubrificante para a usinagem de materiais poliméricos, ocorrendo particularidades durante a usinagem que são função dos parâmetros de corte e que também variam em função da composição do polímero.





**Figura 7. Resultado dos valores médios de rugosidade Rz**

Foi realizada após a medição completa dos valores de rugosidade uma análise de variância (ANOVA) com o objetivo de definir a influência dos parâmetros de entrada; velocidade de corte, avanço e condição de refrigeração tiveram sobre a variável de resposta rugosidade. De acordo com o modelamento para a usinagem do NYLON 6 (Poliamida 6), o valor de Rugosidade Ra só não foi influenciada pela condição de refrigeração isolada. Entretanto, considerando o mesmo material o valor de rugosidade Rz foi influenciado pelas variáveis isoladas de velocidade de corte, o avanço, interação entre a velocidade de corte com avanço e da interação da velocidade de corte, o avanço e a condição de refrigeração.

Para o PP (Polipropileno Homo e Comopimero) os valores encontrados de rugosidade Ra foram influenciados por todos os parâmetros de entrada. Já considerando os valores de rugosidade Rz, da mesma forma que ocorreu com o NYLON 6 (Poliamida 6), pode-se dizer que valor de rugosidade Rz foi afetado pelas variáveis isoladas de velocidade de corte, o avanço, interação entre a velocidade de corte com avanço e da interação entra a velocidade de corte, o avanço e a condição de refrigeração.

Finalmente, os valores de rugosidade Ra encontrados para o POM (Poliacetal Homopolímero) demonstram que apenas a condição de refrigeração não influenciou esses valores de rugosidade. Para os valores de Rz os valores que não tiveram influência sobre a rugosidade foram a condição de refrigeração e a interação entre velocidade de corte e condição de refrigeração. Assim, pode-se considerar que na usinagem de materiais poliméricos, seguindo a mesma tendência na usinagem de materiais metálicos, os valores de rugosidade foram influenciados de forma mais significativa pelo valor de avanço da ferramenta e, em segundo plano pela velocidade de corte. O sistema de ar gelado não trouxe uma influência significativa para os valores de rugosidade como se esperava quando comparado com o tradicional sistema de emulsão.

#### 4. CONCLUSÕES

De acordo com os dados obtidos nos experimentos de torneamento de matérias poliméricos como o NYLON 6 (Poliamida 6), PP (Polipropileno Homo e Comopimero) e o POM (Poliacetal Homopolímero), pode-se concluir que:

- ✓ O comportamento dos materiais poliméricos é bem próximo dos materiais metálicos sendo influenciado, em uma primeira avaliação, pelo avanço e em uma segunda análise pela velocidade de corte.
- ✓ Conforme os dados da Tab. (1) nota-se que as propriedades mecânicas e físicas dos polímeros apresentam variações significativas e, dessa forma, conclui-se que o PP por apresentar um módulo de elasticidade menor com uma elongação dez vezes maior, justifica o comportamento aleatório para os valores de rugosidade devido a sua baixa ductibilidade;
- ✓ A rugosidade média nos valores Ra ou Rz não sofreu influência dos sistemas de refrigeração empregados nos experimentos;
- ✓ A utilização do sistema de ar gelado na usinagem de materiais poliméricos, não demonstrou uma eficiência significativa que justifique a substituição dos sistemas tradicionais como a emulsão, a não ser quando se considera as condições ambientais;
- ✓ O comportamento dos valores de Ra e Rz seguiram uma tendência, apresentando em alguns casos específicos variações significativas;

- ✓ Considerando a influência dos sistemas de refrigeração, para os experimentos realizados que usar materiais poliméricos a seco é a melhor alternativa em função da perspectiva ambiental.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo Maciel situado no distrito industrial de lavras pela parceria e cooperação para a realização dos experimentos.

## 6. REFERÊNCIAS

- Bhatnagar, N.; Ramakrishnan, N.; Naik, N.K.; Komanduri, R., 1995. "On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.35, pp. 701–716.
- Brandão, L. C. (2006). "Estudo experimental da condução de calor no fresamento de materiais endurecidos utilizando altas velocidades de corte". Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- DeBra, D.B.; 1984 "Design of laminar flow restrictors for damping pneumatic vibration isolators", CIRP Annals, v.33, pp. 351–61.
- Donaldson, R.R., Maddux, A.S. 1984 "Design of a high-performance slide and drive system for a small precision machining Research lathe", CIRP Annals, v.33, pp.243–8.
- Donaldson, R.R.; Patterson, S.R. 1983 "Design and construction of a large, vertical axis diamond turning machine", Proceedings of the SPIE, v. 433, pp.62–7.
- Erenkov, O.Y.; Zakharychev, S.P.; Gavrilova, A.V. Otmakhov, D.V. 2008, "Influence of the Machining Conditions on the Surface Hardness of Polymer Parts, Russian Engineering Research, v. 28, n 3, pp. 234–236.
- Fransé, J. 1990, "Manufacturing techniques for complex shapes with submicron accuracy". Reports on Progress in Physics, v. 53, pp. 1049–1094.
- Fröhlingdorf, W.; Unger, H. (1999). "Numerical Investigations of the compressible flow and the energy separation in the Ranque-Hilsch vortex tube". International Journal of Heat and Mass Transfer. Pergamon, v. 42, n.3, p. 415-422.
- Incomplast, 2010 "Tabela de propriedades físicas, mecânicas, químicas, elétricas e térmicas dos materiais poliméricos". <http://www.incomplast.com.br/htm/materiais.htm>, acesso em 20 de maio de 2010.
- Jiang, Q.; Zhang, L.C.; Pittolo, M. 2000 "The dependence of surface finishing of spectacle polymer upon machining conditions", In: D.Chen et al., editors. Progress of Machining Technology . pp.7–12.
- Kobayashi, A.K, 1967, "Machining of plastics". New York, McGraw-Hill.
- Palanikumara, K.; Matab, F.; Davim, J.P. 2008 "Analysis of surface roughness parameters in turning of FRP tubes by PCD tool", Journal of Materials Processing Technology, v.204, pp. 469–474.
- Sakuma, K., Seto, M., 1983, "Tool wear in cutting glass-fiber-reinforced plastics. The relation between fiber orientation and tool wear". Bulletin of JSME, v. 26, PP. 1420–1427.
- Stopplásticos, 2009 "Dicas de usinagem de materiais plásticos", [http://www.stopplasticos.com.br/nossas\\_dicas.htm](http://www.stopplasticos.com.br/nossas_dicas.htm), acesso em 09 de fevereiro de 2010.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# MACHINING OF POLYMERIC MATERIALS USING FROZEN AIR COOLING SYSTEM

Diogo Maciel, [diogo@grupomaciel.com.br](mailto:diogo@grupomaciel.com.br)  
Carlos Henrique Lauro, [caiquelauro@gmail.com](mailto:caiquelauro@gmail.com)  
Lincoln Cardoso Brandão, [lincoln@ufsj.edu.br](mailto:lincoln@ufsj.edu.br)

Universidade Federal de São João del Rei - Praça Frei Orlando, 170 - Centro,

**Resumo:** *Currently the daily life of human being is influenced to a greater or lesser requirement by various kinds of materials developed. Whereas the main materials used by man, the polymers have occupied the place between other materials due to their characteristics in the production. The main variables that we consider are; price, resistance to abrasion and degradation in corrosive environment and production flexibility. The aim of this work was study the machinability of 3 kinds of polymers using two cutting speeds and three feeds. It was applied the cold air cooling system and coolant emulsion comparing with dry machining, and was considered the surface roughness as output variable. It was concluded that the frozen air system not was a good alternative for cooling during the machining and the feed was more significant than others variables as cutting speed and cooling systems.*

**Palavras-chave:** *Machining of Polymers; Frozen Air System; Cutting Speed, Roughness.*