



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ERICK MARTINS DE OLIVEIRA

RELATÓRIO FINAL

PROGRAMA DE IC:

- PIBIC
- PIBIC Af
- PIBIC EM
- PIBITI

MODALIDADE:

- CNPq
- UFPR TN
- Fundação Araucária
- Voluntária

**AValiação de Ferramentas Comerciais na Usinabilidade de
Materiais Poliméricos**

Relatório apresentado à Coordenação de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial da conclusão das atividades de Iniciação Científica ou Iniciação em desenvolvimento tecnológico e Inovação - Edital 2022
Orientador(a): Prof.(a). Dalberto Dias da Costa
Título do Projeto: Usinabilidade de materiais poliméricos.

CURITIBA

2023

2. AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS COMERCIAIS NA USINABILIDADE DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

3. RESUMO

As condições de usinagem e as geometrias de ferramenta exercem influência significativa sobre a usinabilidade dos materiais. Para os materiais metálicos o conhecimento acerca dos melhores parâmetros de corte é bastante difundido. No entanto, para os polímeros a escassez de informação e de ferramental apropriado se torna um obstáculo na usinagem desse material. O objetivo desse trabalho é avaliar a influência do ângulo de posição, geometria de ferramenta e das condições de corte sobre a rugosidade superficial e sobre as forças envolvidas no processo, na usinagem do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE). Foram realizados ensaios em tornos convencionais e CNC, utilizando insertos fabricados para materiais metálicos. As principais conclusões foram que o ângulo de posição e a geometria do ferramental (raio de ponta e quebra-cavaco) afetaram tanto a qualidade superficial quanto os esforços durante a usinagem.

4. INTRODUÇÃO

A busca continua por materiais mais leves, baratos e sustentáveis tem proporcionado uma evolução na engenharia moderna. Nesse contexto de inovação, os polímeros surgem como uma alternativa aos metais em diversas frentes. Os metais são escolhidos em inúmeras aplicações de engenharia devido à sua resistência, durabilidade, condutividade elétrica e térmica. No entanto, o avanço tecnológico e a compreensão das propriedades mecânicas e de processamento dos polímeros vêm proporcionando o desenvolvimento de materiais com alto desempenho, possibilitando a aplicação em áreas antes dominadas pelos metais.

Os polímeros são consideravelmente mais leves do que os metais, fator preponderante em aplicações aeroespaciais e automotivas, setores nos quais a redução de peso tem influência sobre a eficiência e desempenho. Além disso, e ao contrário dos metais, os materiais poliméricos apresentam um bom desempenho em ambientes corrosivos, permitindo também a sua utilização em setores como a indústria química e marítima, diminuindo a necessidade de revestimentos protetores.

Além disso, a fabricação de polímeros geralmente requer menor gasto de energia do que a produção de metais e não envolve práticas tão intensivas de

mineração. Outra vantagem dos polímeros é em relação a biocompatibilidade. Muitos materiais poliméricos são inodoros e não reagem de forma adversa com o corpo humano, tornando-os adequados para a confecção de implantes médicos.

No entanto, a usinagem de materiais poliméricos ainda é um desafio devido ao seu distinto comportamento mecânico e também devido a escassez de informações sobre o assunto. Dessa forma, tanto a escolha de ferramental quanto a de parâmetros de usinagem tem influência significativa sobre a usinabilidade desses materiais.

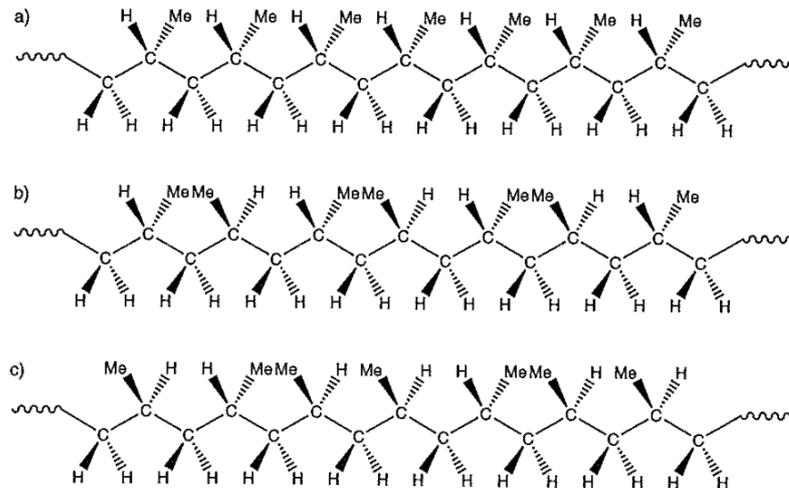
O objetivo desse trabalho é avaliar a influência do ângulo de posição e da geometria de ferramenta sobre a rugosidade superficial após a usinagem do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) utilizando ferramentas comerciais. Além disso, também será realizada uma análise dos esforços de corte envolvidos no processo.

5. REVISÃO DA LITERATURA

Peacock e Calhoun [1] destacam que os polímeros em grande parte são obtidos por polimerização de adição ou de condensação. Na polimerização de adição os monômeros que contem duplas ligações são adicionados sequencialmente ao final da cadeia polimérica. Na polimerização por condensação os monômeros e cadeias poliméricas combinam-se por eliminação de moléculas menores, por exemplo a água, para formar um polímero maior.

Ainda de acordo com Peacock e Calhoun [1] sobre a taticidade dos polímeros, ou seja o arranjo dos grupos químicos ao longo da cadeia principal, podemos subdividi-los em três categorias: Isotáticos, sindiotáticos e atáticos. Nos polímeros isotáticos os grupos químicos estão no mesmo lado da cadeia principal, resultando em um arranjo ordenado e conseqüentemente em altas temperaturas de fusão e elevada rigidez. Para os polímeros sindiotáticos os grupos químicos similares estão dispostos alternadamente ao longo da cadeia principal, gerando um grau de ordenamento menor. Nos polímeros atáticos os grupos químicos estão distribuídos aleatoriamente ao longo da cadeia, proporcionando propriedades químicas mais flexíveis. Na imagem abaixo pode-se identificar os três tipos de arranjos encontrados no polipropileno.

Figura 1 – Tipos de taticidade do polipropileno: a) isotático, b) sindiotático, c) atático.



Fonte: Peacock e Calhoun(2006).

Alguns plásticos de engenharia podem combinar leveza e resistência a corrosão com uma boa tenacidade e rigidez em uma ampla faixa de temperaturas. Além disso, podem ser manufacturados facilmente e rapidamente em temperaturas moderadas (200 a 300°).

Os polímeros podem ser divididos em dois grupos:

- Polímeros Termoplásticos: São aqueles que tem capacidade de amolecer quando aquecidos e de solidificar quando resfriado. Além disso, eles podem ser reprocessados várias vezes sem perda significativas de suas propriedades.

- Polímeros Termofixos: São aqueles que após processo de solidificação ficam rígidos e não amolecem novamente quando reaquecidos. Esses tipos de polímeros são usados geralmente em aplicações que exigem boa resistência mecânica e estabilidade dimensional.

Kobayash [2] relata que usualmente partes plásticas são produzidos através de processos de moldagem. No entanto, quando deseja-se obter acurada precisão dimensional ou produção de pequenos lotes, o investimento em moldes ou equipamentos de moldagem não é uma opção economicamente interessante.

Costa et al [3] reportam que além da inviabilidade econômica na produção em baixa escala, alguns polímeros são difíceis de injetar, termoformar ou comprimir tornando a usinagem uma alternativa interessante.

Ainda de acordo com Costa et al [3] a confecção de próteses para artroplastia fabricadas a partir do polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) tem como principal processo de produção a usinagem.

Jagtap e Mandave [4] relatam que para a obtenção de maior precisão geométrica e de qualidade superficial, os produtos plásticos devem passar pelos processos de usinagem como torneamento, furação e fresamento. Ainda segundo os autores, a rugosidade superficial obtida após esses processos de usinagem está diretamente associada aos parâmetros de corte como velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de corte, entre outros.

Kobayash [2] ainda relata que além dos parâmetros de usinagem a geometria da ferramenta exerce fundamental influência sobre a formação do cavaco, desgaste de ferramenta e rugosidade superficial.

Salles e Goncalves [5] destacam que além dos parâmetros de corte e da geometria das ferramentas, as propriedades físicas e químicas dos materiais, especialmente em relação aos polímeros, exercem significativa influência sobre o acabamento superficial e precisão dimensional. Segundo os autores, as propriedades mecânicas, térmicas e reológicas são fatores determinantes e limitantes na usinagem desses materiais.

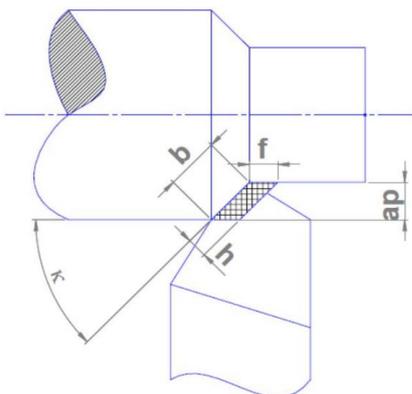
Alauddin et al [6] reportam que durante a usinagem de plásticos é desejável a formação de cavaco contínuo, a fim de evitar a geração de calor e deformação do material. De acordo com os autores, a escolha correta dos parâmetros de corte e de geometria de ferramenta com ângulo de inclinação maior que o ângulo crítico possibilitam essa formação de cavaco e ainda diminuem o calor gerado no processo.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de avaliar a influência do ângulo de posição após a usinagem do UHMWPE foram realizados dois ensaios em torno convencional variando o ângulo de posição. No primeiro experimento foi realizado o faceamento do material com avanço(f) de 0,0509 mm/v, velocidade de corte(V_c) de 250 mm/min a profundidade de corte(a_p) de 1mm. Para o segundo experimento foi realizado o cilindramento do UHMWPE com velocidade de corte de 250 mm/min, avanço(f) de 0,0509 mm/v e profundidade de corte(a_p) de 0,24 mm. Após os ensaios foram

realizadas três medições de rugosidades (R_a) para cada ângulo, obtidas com o auxílio de um rugosímetro. O inserto utilizado foi o TNGG 160402-M3N-P IC20 do fabricante Iscar. Na imagem abaixo está representado o ângulo de posição(K), espessura de corte(h), largura de corte(b) e área de corte(s).

Figura 2. Representação do ângulo de posição.



Fonte: Notas de aula do Laboratório de Usinagem da UFPR⁷.

Para avaliar a influência do raio de ponta sobre a rugosidade superficial foi realizado a operação de cilindramento do material escolhido. Para realização dos ensaios foi utilizado um torno com comando numérico computadorizado (CNC), marca Mazak, modelo QTN100II. O comando numérico computadorizado utilizado foi o Mazatrol-Nexus, que viabiliza a realização dos ensaios com velocidade de corte(V_c) constante durante a usinagem.

O material utilizado foi o Polímero de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE), comercializado em forma de barra cilíndrica e fornecido pelo fabricante Nita Plast. Foi adquirido um metro de barra do material e essa foi dividida em peças menores para a confecção dos corpos de prova.

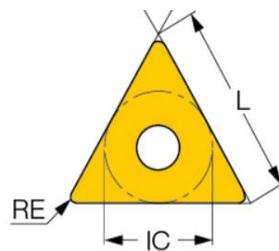
O mesmo porta-ferramenta foi utilizado em todos os ensaios, Modelo MTJNL – 2020K16H4 . Os três insertos utilizados foram: Modelo TNGG 160404 – M3N-P IC20 – marca ISCAR, Modelo TNMG 160408 M3N-P IC20 – marca ISCAR e Modelo TNGG 160416 – KR 3215 – marca Sandvik, conforme tabela 1. A velocidade de corte (V_c) utilizada foi de 250 mm/min e a profundidade de corte (a_p) de 1 mm. As pastilhas utilizadas no desenvolvimento dos experimentos são confeccionadas para usinagem de metais. No entanto, um dos objetivos desse estudo é avaliar o emprego desses ferramentais no corte de polímeros.

Tabela 1. Insetos

FERRAMENTAS		
	Raio de ponta(mm)	Quebra cavaco / Ângulo
A	1,6	KR / -7°
B	0,8	M3N / 24°
C	0,4	M3N / 24°

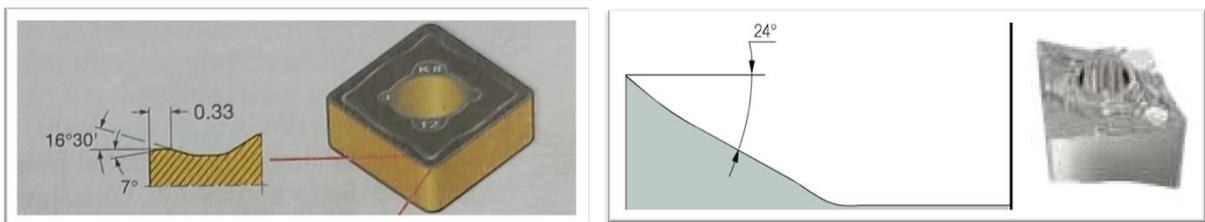
Fonte: O autor (2023).

Figura 3. Representação do raio de ponta (re).



Fonte: Fabricante ISCAR.

Figura 4. Representação Quebra-cavaco



Fonte: Fabricantes Sandvik(a esquerda) e ISCAR(a direita).

Os experimentos foram organizados conforme a Tabela 2, sendo realizados 9 ensaios e ao término mais 9 repetições sob as mesmas condições de usinagem. Dessa forma, é possível analisar a influência do avanço(f) e da geometria de ferramenta sobre a rugosidade superficial e também sobre as componentes das forças de usinagem (F_c – Força de corte; F_f – Força de avanço e F_p – Força passiva). A ordem de execução foi definida em função do raio de ponta devido a praticidade em alterar o programa CN.

Tabela 2. Condições de ensaio.

Ordem do ensaio	f(avanço - mm/rot)	re(Raio de ponta - mm)
1	0,1	1,6
2	0,2	1,6
3	0,3	1,6
4	0,1	0,8
5	0,2	0,8
6	0,3	0,8
7	0,1	0,4
8	0,2	0,4
9	0,3	0,4

Fonte: O autor (2023).

As rugosidades superficiais foram obtidas com o auxílio de um rugosímetro de contato (marca Taylor Hobson, modelo Surtronic S128). Foram medidas as rugosidades Ra e Rt para um “cut-off” de 0,8mm. Além disso, para cada corpo de prova foram realizadas três medições de rugosidade em áreas diferentes da peça.

As componentes da força de usinagem – corte (F_c), avanço (F_f) e passiva (F_p) - foram obtidas através de um dinamômetro piezoelétrico (modelo 9129A, marca Kistler), um conversor/amplificador de carga (modelo 5070A, marca Kistler,), uma placa de conversão analógico/digital (modelo CIO-DAS08 marca Measuring Computing) e um computador. Os dados foram registrados por meio de um software com uma taxa de amostragem de 120 leituras por segundo. Dessa forma, os dados obtidos foram analisados empregando-se o método de média móvel com 20 janelas de leitura, o que possibilitou a construção dos gráficos do tipo “Força versus Tempo”, para cada ensaio realizado.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. Avaliação do Ângulo de Posição

Na tabela a seguir estão os resultados obtidos após os experimentos.

Tabela 3. Rugosidades

Faceamento			
Ângulo de Posição (K)	Ra (um)		
117°	1,57	0,87	1,09
27°	1,34	1,65	1,79

Cilindramento			
Ângulo de Posição (K)	Ra (um)		
93°	1,09	1,12	1,15
75°	1,64	1,64	1,30
33°	1,78	1,72	1,36

Fonte: O autor (2023).

No processo de faceamento do material é importante ressaltar que a velocidade de corte se altera durante o processo, devido sua relação direta com o diâmetro da peça. De uma maneira geral, observou-se que tanto para o faceamento quanto para o cilindramento os ângulos de posição menores tendem a apresentar uma rugosidade mais elevada.

7.2. Avaliação da Geometria de Ferramenta

7.2.1. Influência das Condições de Corte Sobre a Rugosidade

Após o término dos 9 experimentos propostos e das 9 repetições, sob as condições de usinagem pré-determinadas, obteve-se a média das rugosidades (Ra e Rt) para cada um dos experimentos, conforme tabela 4.

Tabela 4. Rugosidades

Experimento	Rugosidades(um)		Experimento	Rugosidades(um)	
	Ra	Rt		Ra	Rt
1	4,50	32,50	R1	4,20	30,67
2	3,57	28,50	R2	3,43	25,50
3	3,78	21,38	R3	3,93	21,83
4	1,00	12,38	R4	0,83	5,83
5	2,20	14,13	R5	2,10	10,67
6	3,63	17,50	R6	4,33	19,33
7	1,73	12,00	R7	0,70	6,00
8	5,25	25,50	R8	3,57	17,17
9	12,80	65,17	R9	39,97	42,50

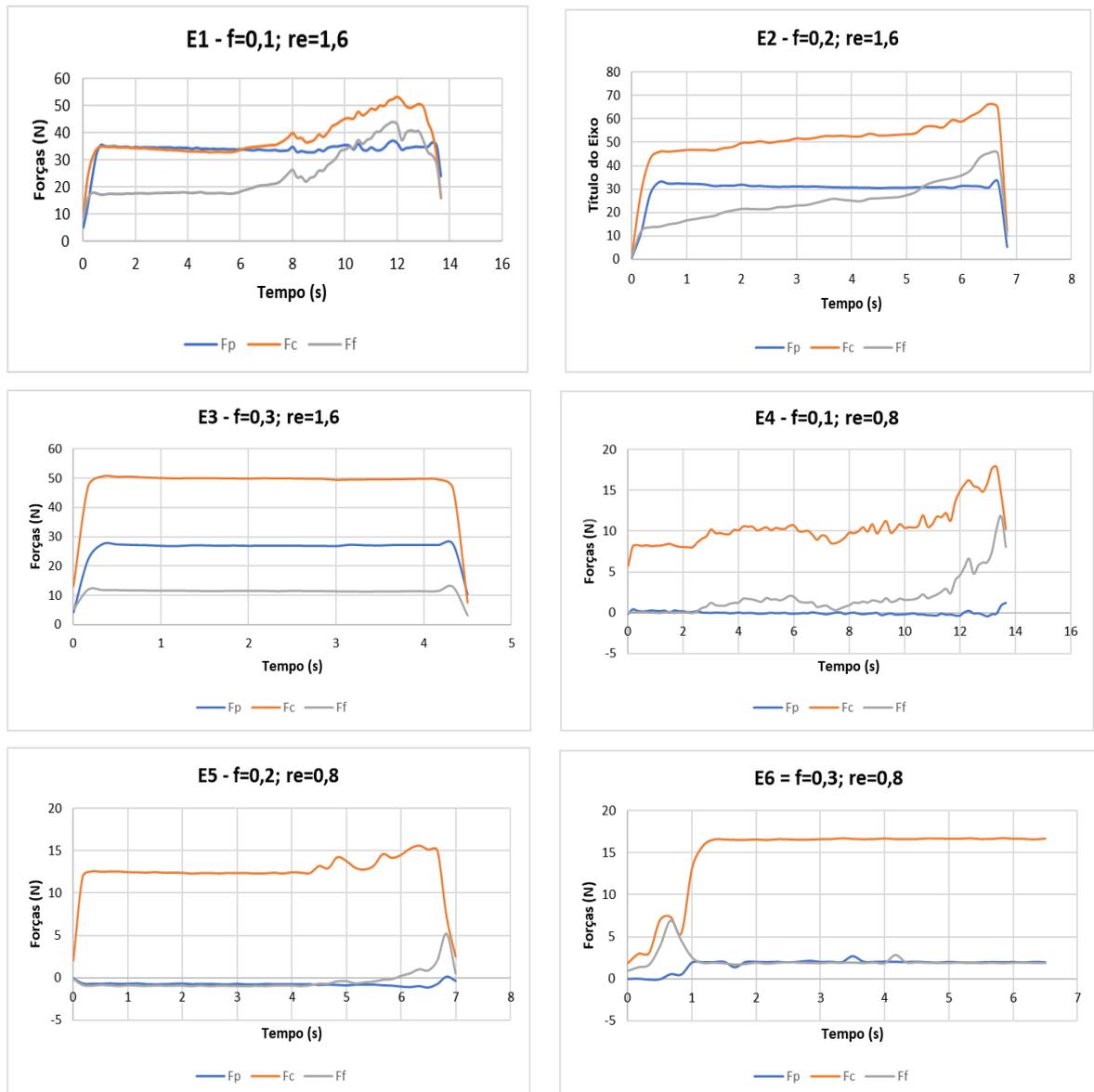
Fonte: O Autor (2023).

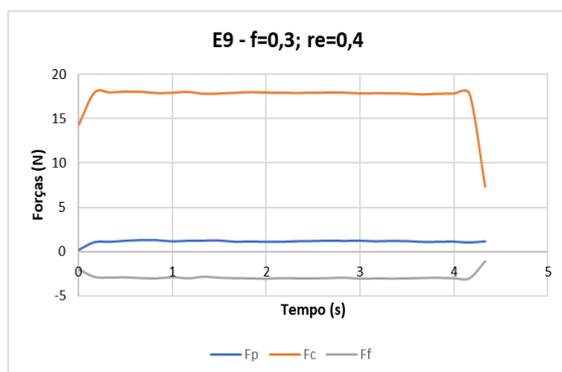
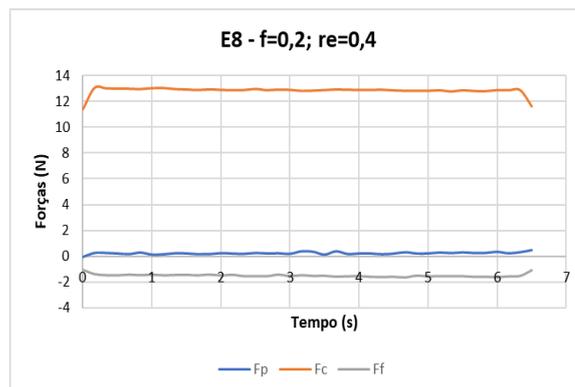
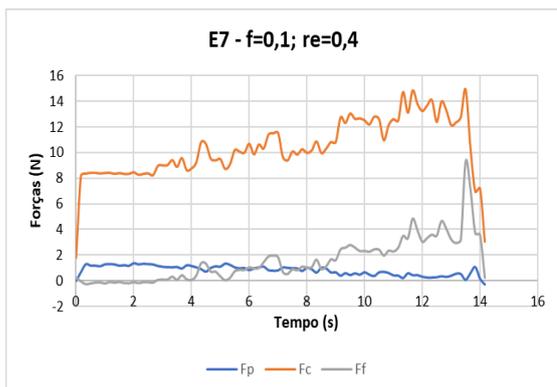
A partir da análise dos dados obtidos é possível verificar uma tendência de diminuição da rugosidade quando utilizado os ferramentais B e C (experimentos 4, 5, 6, 7, 8 e 9). No entanto, tanto para o experimento 9 quanto para a sua repetição, os valores de Ra e Rt foram os maiores registrados.

7.2.2. Influência das Condições de Corte Sobre as Forças de Usinagem.

Em paralelo também foram obtidos os valores das forças de usinagem para cada um dos experimentos realizados, conforme gráficos a seguir.

Figura 5. Gráficos das forças de usinagem.





Fonte: O Autor(2023).

Com a separação da região de interesse, tempo no qual a usinagem de fato aconteceu, foram adquiridas as forças médias envolvidas na usinagem, conforme tabela 5.

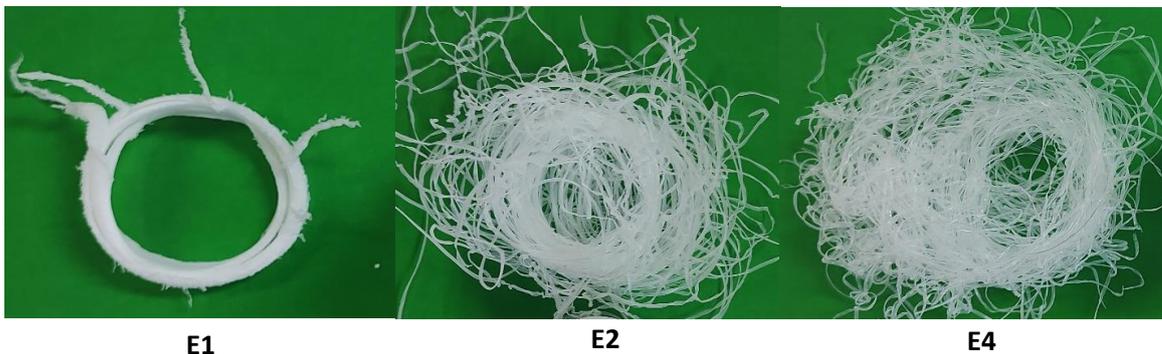
Tabela 5. Forças de usinagem (valores absolutos).

Experimento	Forças(N)					
	Ensaio			Repetições		
	Fc Média	Fp Média	Ff Média	Fc Média	Fp Média	Ff Média
1	38,89	34,43	25,23	32,97	33,39	16,64
2	52,95	31,12	26,46	42,50	31,90	11,38
3	49,82	27,10	11,45	59,37	25,41	22,72
4	10,61	0,09	1,74	10,56	0,17	1,56
5	12,99	0,77	0,68	12,16	0,80	1,21
6	16,65	1,95	1,87	15,92	1,55	1,90
7	10,70	0,85	1,38	8,11	0,17	0,41
8	12,90	0,21	1,52	12,90	0,55	1,49
9	17,93	1,16	2,98	18,18	1,23	1,84

Fonte: O Autor (2023).

De maneira semelhante ao observado nos resultados da rugosidade, as forças de usinagem também apresentaram uma tendência de diminuição quando utilizados os ferramentais “B” e “C”, que possuem o mesmo quebra-cavaco. No entanto, as diferenças entre os esforços quando utilizado o raio de ponta de 0,4 mm e o de 0,8mm não foram tão significativas. Durante a realização dos testes também foram obtidas imagens das formas de cavaco, figura 6.

Figura 6. Formas de cavaco.



Fonte: O Autor (2023).

Nos experimentos 1 e 2 observaram-se formatos de cavaco mais espessos, de forma que no primeiro ensaio ocorreu um “arrancamento” de material. Ao analisar as diferentes geometrias de inserto utilizadas e as formas de cavaco resultantes, ficou evidente que para a ferramenta “A” as forças de usinagem foram significativamente maiores. Para os outros raios de ponta, mesmo com diferentes formas de cavaco, não se obteve variação significativa nos esforços.

8. CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação sobre a influência do ângulo de posição (K) foi possível concluir que para as duas operações de usinagem, ângulos de posição menores tendem a apresentar uma rugosidade mais elevada. Uma possível explicação para isso é que a medida que o ângulo de posição diminui observa-se uma maior dificuldade na remoção do cavaco, causando mais atrito com a peça e assim influenciando na rugosidade final.

A respeito da geometria de ferramenta e com base nos resultados obtidos, a utilização da ferramenta A (raio de ponta de 1,6 e quebra-cavaco -7°) na usinagem do UHMWPE, apresentou tanto esforços de corte mais elevados quanto maiores rugosidades, impactando na qualidade superficial das amostras e na energia envolvida no processo. Para os outros ensaios observa-se uma tendência no aumento da rugosidade e das forças conforme aumento do avanço. Porém, ao relacionar a geometria do inserto para as mesmas condições de usinagem, não foi observado diferença expressiva na rugosidade e nas forças de usinagem. Vale ressaltar que o quebra-cavaco da ferramenta “A” possui um ângulo de saída positivo, impactando na remoção de material e consequentemente nos resultados.

9. REFERÊNCIAS

- [1]. Peacock, J.A., Calhoun, A., 2006, “Polymer Chemistry: Properties and Applications”. Hanser Gardner Publications, Inc, Ohio.
- [2]. Kobayashi A., 1967, “Machining of Plastics”. McGraw-Hill, New York.
- [3]. Da Costa, D. D., Athayde, J. N., Alencar, S. A., 2017, “Avaliação da Usinabilidade do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE)”. 9º Congresso Brasileiro de Fabricação.
- [4] Jagtap, T.U., Hemant, A.M., 2015, “Machining of plastics: a review. International Journal of Engineering and General Science” 3:2091–2730.
- [5] Salles, J.L.C., Gonçalves, M.T.T., 2003, "Effects of machining parameters on surface quality of the ultra high molecular weight polyethylene", revista Matéria, v. 8, n. 1, pp 1-10.
- [6] Alauddin, M., Choudhury, I., El Baradie, MA., Hashmi, MS., “Plastic and their machining: A review” Journal of Materials Processing Technology, 54 (1995) 40-46.
- [7] Notas de aula do laboratório de usinagem da Universidade Federal do Paraná. Disponível em: . Acesso em: 24 de março de 2023.