



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
COORDENADORIA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E INTEGRAÇÃO ACADÊMICA  
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EM DESENVOLVIMENTO  
TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO

**SÁVIO DE ARRUDA ALENCAR**

## **RELATÓRIO PARCIAL**

### **INICIAÇÃO CIENTÍFICA:**

PIBIC CNPq ( ), PIBIC CNPq Ações Afirmativas ( ), PIBIC UFPR TN ( ), PIBIC Fundação Araucária ( ), PIBIC Voluntária ( x ), Jovens Talentos ( ), PIBIC EM ( ).

### **INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO:**

PIBITI CNPq ( ), PIBITI UFPR TN ( ), PIBITI Funttel ou PIBITI Voluntária ( ).

(Período no qual esteve vinculado ao Programa 01/08/2016 a 31/07/2017)

## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE SAÍDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE NA USINABILIDADE DE DIFERENTES MATERIAIS POLIMÉRICOS**

Relatório apresentado à  
Coordenadoria de Iniciação Científica  
e Integração Acadêmica da  
Universidade Federal do Paraná por  
ocasião da conclusão das atividades  
de Iniciação Científica ou Iniciação em  
desenvolvimento tecnológico e  
Inovação - Edital 2016/2017.

**Dalberto Dias da Costa / Mecânica**

**Usinabilidade De Materiais Poliméricos / 2016020427**

**CURITIBA**  
2017

## 1. RESUMO

Ultimamente os polímeros estão sendo utilizados cada vez mais e em diversas áreas da engenharia. Isso se deve ao desenvolvimento das tecnologias de seu processamento, o que resulta na melhora de suas propriedades e os torna uma opção mais viável. Alguns polímeros, quando utilizados como produtos com geometrias complexas, só podem ser manufaturados por meio do processo de usinagem. Por isso, se faz necessário estudos mais específicos na área. Em geral, os estudos da usinabilidade dos polímeros são feitos a partir de uma modelagem que se baseia no corte ortogonal e já comprovaram a grande influência da geometria da ferramenta sobre a qualidade final da peça e esforços durante o processo de usinagem. Porém, poucos estudos abordam essas influências baseadas no corte oblíquo, o qual representa de forma mais fiel a realidade dos processos industriais. Assim, o objetivo desse trabalho é estudar a influência dos ângulos de saída e posição da ferramenta sobre a usinabilidade dos polímeros. Para esse estudo, foram adotadas 3 abordagens para utilização das ferramentas: 1) utilizando ferramenta em aço ferramenta D6 (Villares VC130) inteiriça fabricada com geometrias específicas para o corte de polímeros; 2) utilizando pastilhas comerciais, modelo (modelo) WNMG060404-NF – IC907 – marca ISCAR), dedicadas para corte de metais; 3) utilizando pastilhas em aço ferramenta D6 (Villares VC130) fabricada também com geometrias específicas para o corte de polímeros. O método de fabricação de ferramentas está sendo desenvolvido para suprir a necessidade de se obter geometrias específicas para o estudo, as quais não estão disponíveis na linha comercial. Como resultado dos estudos feitos, utilizando as pastilhas comerciais, concluiu-se que a formação irregular de cavacos, a qual pode ser creditada à geometria da ferramenta, comprometeu muito a qualidade da superfície usinada. Além disso, ao avaliar a usinabilidade do material tendo por critério os esforços de corte, pode-se afirmar que, para as condições aqui estudadas, os valores medidos foram muito baixos e estão muito próximos daqueles já reportados na literatura especializada. Apesar das dificuldades em se fabricar as geometrias específicas para a ferramenta, espera-se obter ótimas rugosidades e esforços ainda menores na usinagem dos polímeros com as ferramentas dedicadas.

## 2. INTRODUÇÃO

A opção por polímeros ao invés de metais na engenharia é a cada dia mais expressiva. Isso se dá devido ao avanço em estudos referentes ao tema e também pelo desenvolvimento de suas propriedades, tais como mecânicas e térmicas, e a evolução tecnológica em seus processos de fabricação, podendo se produzir com mais qualidade e de forma mais barata.

Um importante campo de atuação dos polímeros na atualidade é a bioengenharia. Alguns deles são avaliados como biocompatíveis, ou seja, são reconhecidos pelo corpo humano sem

haver rejeição, podendo substituir tecidos e órgãos em, por exemplo, casos de artroplastia (Kurtz et al 2009) e a cranioplastia (Da Costa e Lajarin, 2012).

Por isso, um bom aliado para solucionar esse problema é o processo de usinagem, onde é possível obter elevada precisão dimensional ao mesmo tempo que se produz geometrias complexas.

Com o intuito de se conhecer mais sobre a usinabilidade do UHMWPE neste contexto, este trabalho investiga, em duas etapas, qual a relação entre os parâmetros de usinagem e as características finais da peça. Na primeira etapa, são avaliados os esforços de corte, rugosidade e formas dos cavacos utilizando como ferramenta pastilha de torneamento de metal duro.  **seguida, avalia-se a integridade das superfícies usinada, por meio de ensaios tribológicos,** utilizando pastilhas em aço ferramenta D6 (Villares VC130) de fabricação própria.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

De modo geral, a usinabilidade dos polímeros é considerada relativamente alta em comparação aos materiais metálicos, **avaliando** aspectos como esforços de corte e a vida das ferramentas (JAGTAP; HEMANT, 2015). Porém, ao se avaliar critérios como a rugosidade da superfície usinada; os problemas causados pelo cavaco; e a repetibilidade dimensional, a superioridade em relação aos metais pode deixar de existir (JAGTAP; HEMANT, 2015).

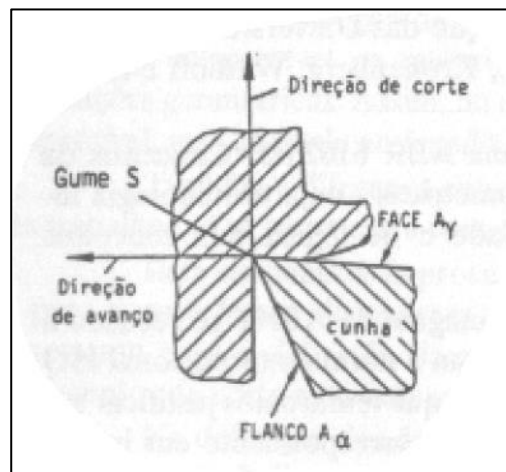
**Devido ao baixo** módulo de elasticidade, os polímeros estão suscetíveis à elevadas deformações elásticas durante processos como a usinagem. Essa recuperação elástica faz com que parte da superfície já usinada entre em contato com a superfície de folga da ferramenta, gerando assim muito calor devido ao **atrito** (KOBAYASHI, 1967). Também segundo Kobayashi (1967), a geometria da ferramenta, especialmente o ângulo de saída, é determinante para que a usinagem seja satisfatória, tendo em vista o acabamento e o controle dimensional. E para isso, se fazem necessárias ferramentas com geometrias dedicadas.

As geometrias das ferramentas de usinagem são normatizadas pelas NBR ISO N3002-1, DIN 6581 e DIN 6181. Elas definem algumas características importantes para fabricação das mesmas. Alguns pontos relevantes para a fabricação da ferramenta estudada serão abordados neste tópico.

Uma ferramenta de torneamento convencional pode ser subdividida em duas partes: o corpo e sua haste. O corpo da ferramenta é a parte da ferramenta onde se fixam as lâminas ou pastilhas de corte ou são produzidas as arestas cortantes. Já a haste é a parte pela qual a ferramenta é fixada na máquina.

Na nomenclatura técnica, as superfícies da ferramenta são indicadas pela letra maiúscula seguida de um sufixo de identificação da superfície. Como exemplo, há a superfície de saída  $A_y$ , sobre a qual o cavaco escoar. Nessa superfície são construídos os quebra-cavacos destinada a

controlar ou quebrar o cavaco que escoo, sendo uma ranhura ou obstrução. Nesse trabalho não será avaliado o quebra-cavaco na ferramenta estudada.



**Figura 1 - Superfície de Saída  $A_\gamma$**   
**Fonte: Stemmer, Ferramentas de Corte I 3ª Ed**

O raio de ponta é uma quina em forma de curva, com raio  $r_e$ . Sua geometria reforça a ferramenta ao reduzir as forças atuantes na mesma. A utilização do raio reduz a espessura do cavaco na ponta. Se o ele for muito pequeno, apenas a parte final do cavaco é reduzida. Com um raio maior, há uma redução gradual de espessura do cavaco, diminuindo os esforços na quina da ferramenta e a quantidade de calor gerada no processo. Apesar de reforçar a ferramenta, o raio de ponta pode induzir vibrações devido a um comprimento excessivo de contato entre o gume e a peça e à espessura desuniforme do cavaco. Além disso, o raio de ponta aumenta de 5 a 20% a potência de corte necessária (STEMMER, 1993). Esse aumento se deve ao fato de que a ponta curva provoca o dobramento transversal do cavaco, além do longitudinal causado pelo corte em si.



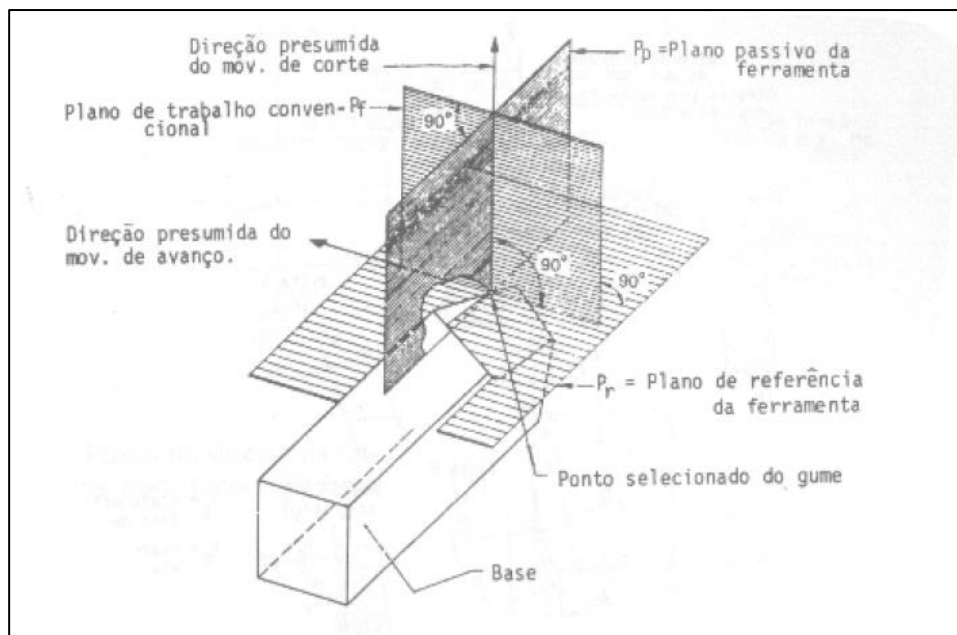
**Figura 2 - Quina Arredondada com raio de ponta  $r_e$**   
**Fonte: Stemmer, Ferramentas de Corte I 3ª Ed**

Todos os movimentos, direções e velocidades são definidas relativamente à peça. O movimento de corte é o principal, produzido manualmente ou pela máquina-ferramenta, com o objetivo de deslocar a ferramenta em relação à peça, sendo possível a retirada de material da face da peça. No torno o movimento de corte é gerado pela rotação da ferramenta. As grandezas

relacionadas ao movimento de corte são seguidas do índice “c”, como exemplo, a velocidade de corte  $v_c$ , que é a velocidade instantânea do movimento de corte no ponto selecionado do gume.

O movimento de avanço tem o objetivo de provocar o deslocamento entre a peça e a ferramenta, o qual, junto ao movimento de corte, provoca a remoção de cavacos. As grandezas relacionadas ao movimento de avanço são seguidas do índice “f”. Assim, a velocidade de avanço  $v_f$  é a velocidade instantânea do movimento de avanço do gume em relação à peça.

Os sistemas de planos de referência são necessários para ser possível caracterizar os ângulos de uma ferramenta de corte. Cada plano é simbolizado pela letra “P” seguido de um sufixo para identificá-lo. O plano de referência efetivo  $P_{re}$  é um plano que passa pelo ponto selecionado do gume e é perpendicular à direção resultante de corte. Plano de trabalho  $P_{fe}$  é um plano que passa pelo ponto selecionado do gume e contém as direções dos movimentos de corte e de avanço. O plano passivo efetivo  $P_{pe}$  passa pelo ponto selecionado do gume e é perpendicular em relação ao plano de referência efetivo  $P_{re}$  e ao plano de trabalho  $P_{fe}$ . A Figura 3 ilustra os planos relativos à ferramenta.



**Figura 3 - Planos de Referência**  
**Fonte: Stemmer, Ferramentas de Corte I 3ª Ed**

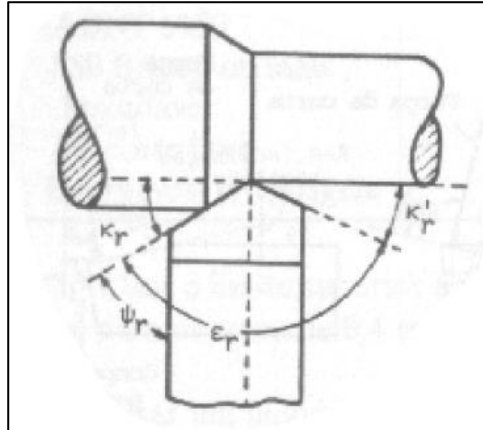
Os ângulos da parte cortante servem para a determinação das geometrias do gume, faces e flancos.

O ângulo de direção do gume da ferramenta  $k_r$ , também chamado de ângulo de posição, é o ângulo entre o plano do gume da ferramenta  $P_s$  e o plano de trabalho  $P_{fe}$ , medido a partir de  $P_r$ . Dentre suas funções estão: distribuir **os esforços** de corte favoravelmente no início e no fim do corte; diminuir a espessura do cavaco e **aumentar** o comprimento atuante do gume; **aumentar** o ângulo de quina  $\epsilon_r$ , aumentando sua resistência mecânica e a dissipação do calor; produz uma

força passiva na ferramenta, o que ajuda a eliminar eventuais vibrações; influi na direção de saída do cavaco (STEMMER, 1993).

Ângulo de quina  $\epsilon_r$  é o ângulo entre o plano do gume principal da ferramenta e o plano do gume secundário da ferramenta, medindo do plano de referência da ferramenta  $P_r$ .

Assim,  $k_r + \epsilon_r + k'_r = 180^\circ$ , conforme ilustra a Figura 4.

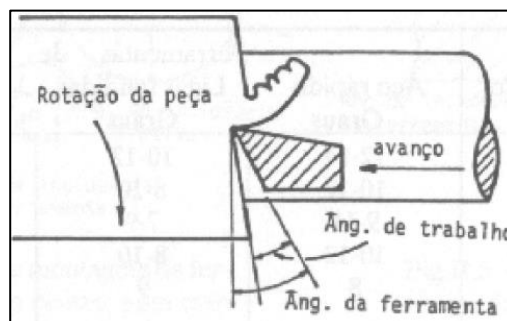


**Figura 4 - Ângulo de Posição**  
**Fonte: Stemmer, Ferramentas de Corte I 3ª Ed**

O uso de um ângulo de posição menor que  $90^\circ$  faz com que o corte se inicie mais afastado da quina da ferramenta, onde o gume é mais resistente e mais resistente ao impacto do contato inicial. Além disto, o gume inicia o trabalho de modo gradual e uniforme. No caso de um ângulo de direção de  $90^\circ$  o corte se inicia imediatamente em todo o gume. Isso ocorre da mesma forma na saída da ferramenta. No caso do emprego de um ângulo de direção menor, a saída da ferramenta é bem gradual.

O avanço  $f$  é a grandeza do movimento de avanço, em milímetro por rotação. Define-se a penetração passiva  $a_p$  como a quantidade que a ferramenta penetra na peça.

Ângulo de incidência ou de folga  $\alpha_n$  tem o objetivo de evitar o atrito entre a superfície à ser usinada da peça e a superfície de incidência da ferramenta permitindo que o gume penetre no material e corte livremente.

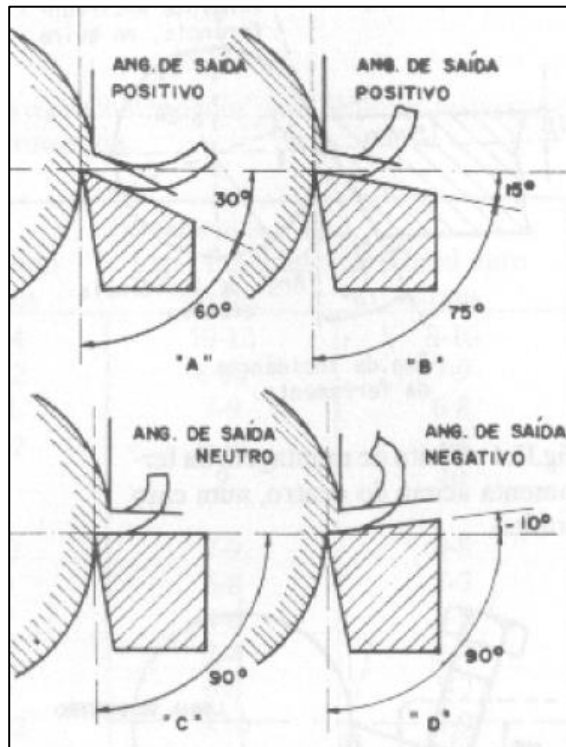


**Figura 5 - Ângulo de Incidência da ferramenta**  
**Fonte: Stemmer, Ferramentas de Corte I 3ª Ed**

Ângulo de saída  $\gamma_n$  é um dos ângulos mais importantes da ferramenta, pois influi decisivamente na força e na potência necessária para o corte, no acabamento da superfície e no

calor gerado. Percebe-se que o trabalho de dobramento do cavaco é bem maior quando o ângulo de saída é negativo se comparado ao ângulo positivo. O ângulo de saída depende da resistência do material da ferramenta de corte e da resistência e dureza do material a usinar. Os materiais com maior resistência à compressão exercem mais pressão sobre a ferramenta, exigindo um menor ângulo de saída (STEMMER, 1993).

Alguns materiais geram bastante calor ao serem usinados. Tais materiais requerem ferramentas com pequenos ângulos de saída, a fim de impedir que a temperatura no gume se aproxime da temperatura de amolecimento da ferramenta. Processos que exijam altas velocidades de avanço também exigem menores ângulos de saída.



**Figura 6 - Influência do Ângulo de Saída**  
**Fonte: Stemmer, Ferramentas de Corte I 3ª Ed**

#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

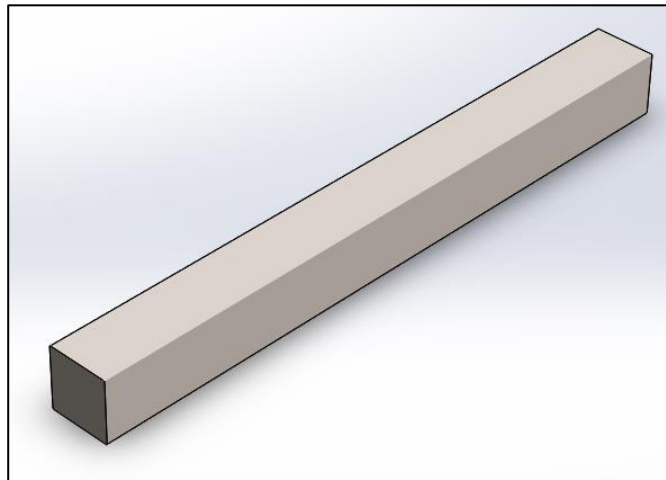
Anteriormente aos ensaios e estudos da literatura base, foi feito breve treinamento sobre segurança e os cuidados no ambiente da oficina, do Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR, e com a operação do maquinário (torno mecânico e CN, centro de usinagem, serra fita, furadeira e retífica). Assim, para as atividades na oficina deve-se vestir calça comprida e utilizar óculos de proteção individual.

Para conseguir melhor efetividade nas atividades desempenhadas, buscou-se conhecer as características fundamentais das ferramentas de corte em torneamento e as principais propriedades dos polímeros que podem influenciar na usinabilidade. Como material base foram

utilizados os livros Ferramentas de Corte I (CASPAR ERICH STEMMER, 1993) e Machining of Plastics (AKIRA KOBAYASHI, 1967).

Nesses estudos, foi concluído que, dentre as características geométricas da ferramenta de corte, o ângulo de saída é o que mais tem influência sobre o resultado final da usinagem. Para que os ângulos de folga da ferramenta não interfiram também, foi adotado 5° de folga em todas as ferramentas.

Após isso, são feitos os preparativos para avaliação da influência do ângulo de corte sobre os esforços de corte e rugosidade. O material adquirido para fabricação das ferramentas será uma barra de aço ferramenta D6 (Villares VC130), ilustrado na Figura 7.



**Figura 7 – Ilustração da barra de aço ferramenta D6 (Villares VC130).**

As ferramentas do tipo bits foram fabricadas no centro de usinagem por fresamento.

Para retificação da superfície de saída, utilizou-se uma mesa inclinada, com escala angular graduada e um fixador fabricado também no laboratório. Assim, é possível fabricar ferramentas com outros ângulos, sempre dentro da faixa da mesa inclinada. [Não possui foto da mesa inclinada]



**Figura 8 - Ferramenta tipo Bits, com dois lados de corte.**

Após a fabricação da primeira ferramenta, com duas pontas de corte, para otimizar o material, foi percebida a dificuldade no processo, devido aos planos inclinados e necessidade de retífica posterior. Assim, os estudos foram feitos utilizando ferramental comercial com geometrias conhecidas enquanto se aguardava a fabricação dos bits. A ferramenta utilizada então em todos



os experimentos foi composta por uma pastilha de metal duro (modelo WNMG060404-NF – IC907 – marca ISCAR) e um porta-ferramenta (modelo MWLNL2020-K06 – marca Sandvik). A Tabela 1 apresenta os ângulos do conjunto pastilha e porta-ferramenta.

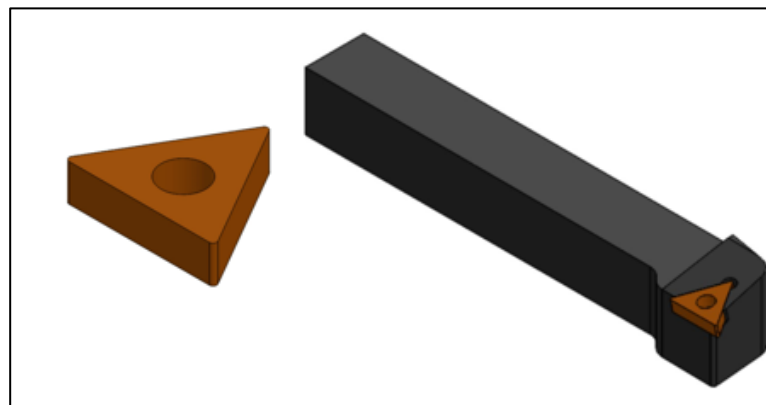


**Figura 9 - Conjunto Pastilha e Suporte.**  
**FONTE: Catálogo Sandvik**

**Tabela 1 - Geometria da Ferramenta Comercial**

| GEOMETRIA         | VALOR |
|-------------------|-------|
| Ângulo de Saída   | -5°   |
| Ângulo de Folga   | 5°    |
| Ângulo de Posição | 95°   |

Há uma terceira abordagem também em andamento. A utilização de pastilhas dedicadas para polímeros, de fabricação própria, utilizando pastilhas em aço ferramenta D6 (Villares VC130). Porém, devido ao curto cronograma, não foi possível fabricá-las até o momento. A Figura 10 ilustra o projeto da montagem das pastilhas no suporte também de fabricação própria.



**Figura 10 - Pastilha dedicada**

## **5. RESULTADO E DISCUSSÃO**

Na primeira tentativa de fabricação, a peça acabada, apesar de possuir os ângulos corretos de acordo com o projeto, não manteve a distância da ponta de corte até a base da ferramenta estabelecida no projeto, sendo essa de extrema importância para o corte adequado.

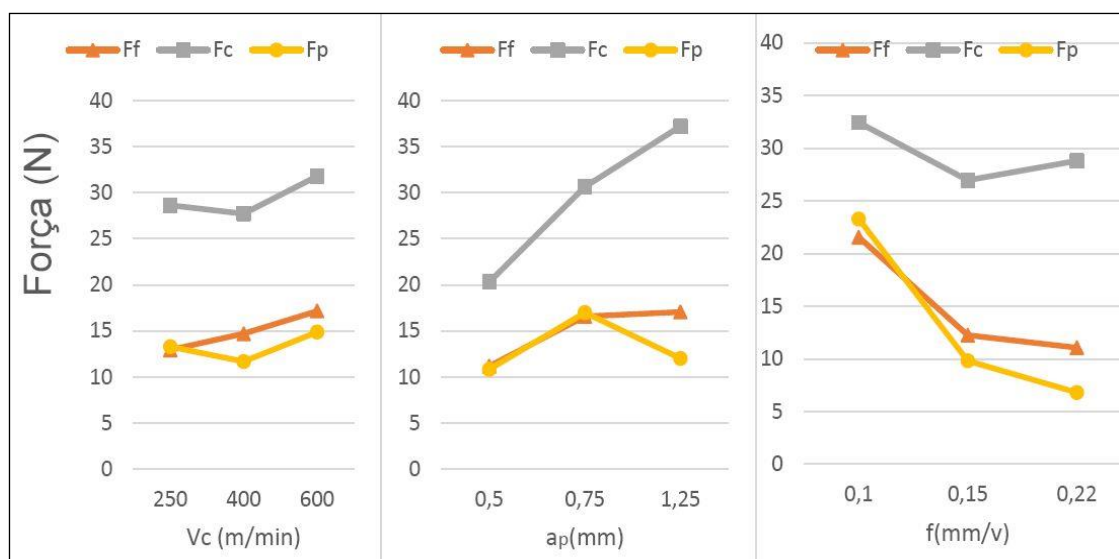
Um ponto que provocou essa imprecisão foi a fixação imprecisa no centro de usinagem. Outro fator que também colaborou é a necessidade de retífica da superfície de saída para, uma vez que ela é feita pelo método de fresamento por plano inclinado, o que resulta em “degraus” na superfície usinada. Assim, houve diferença de décimos de milímetro de uma ponta para outra, diferença suficiente para aumentar as incertezas dos resultados obtidos.

Apesar disso, foram realizados testes utilizando ferramentas comerciais para metais. Sendo possível assim avaliar o desempenho de ferramentas não dedicadas no processo de usinagem de polímeros, além de avaliar também os parâmetros de usinagem como a velocidade de corte  $V_c$ , avanço  $f$  e a profundidade de corte  $a_p$ .

**Tabela 2 - Valores dos parâmetros de usinagem**

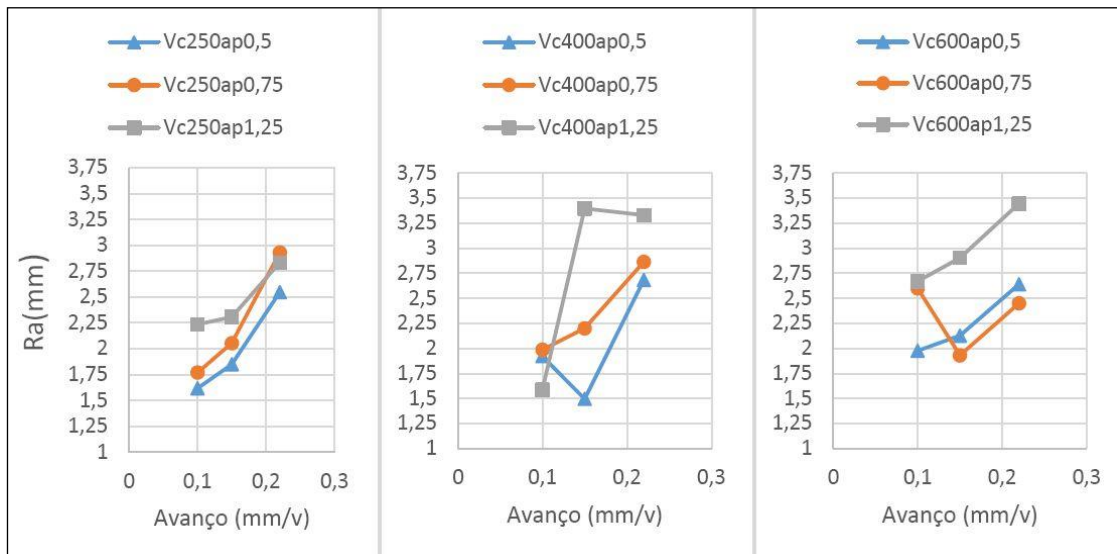
| Ordem do ensaio | $V_c$ (m/min) | $a_p$ (mm) | $f$ (mm/v) |
|-----------------|---------------|------------|------------|
| 1               | 250           | 0,5        | 0,1        |
| 2               | 400           | 0,5        | 0,15       |
| 3               | 600           | 0,5        | 0,22       |
| 4               | 250           | 0,75       | 0,15       |
| 5               | 400           | 0,75       | 0,22       |
| 6               | 600           | 0,75       | 0,1        |
| 7               | 250           | 1,25       | 0,22       |
| 8               | 400           | 1,25       | 0,1        |
| 9               | 600           | 1,25       | 0,15       |

Após a realização dos ensaios, variando um a um dos parâmetros listados na Tabela 2, foi possível concluir que as forças de corte medidas,  $F_c$ ,  $F_f$  e  $F_p$  sofreram maior influência com o aumento do avanço  $f$ , diminuindo com ele.



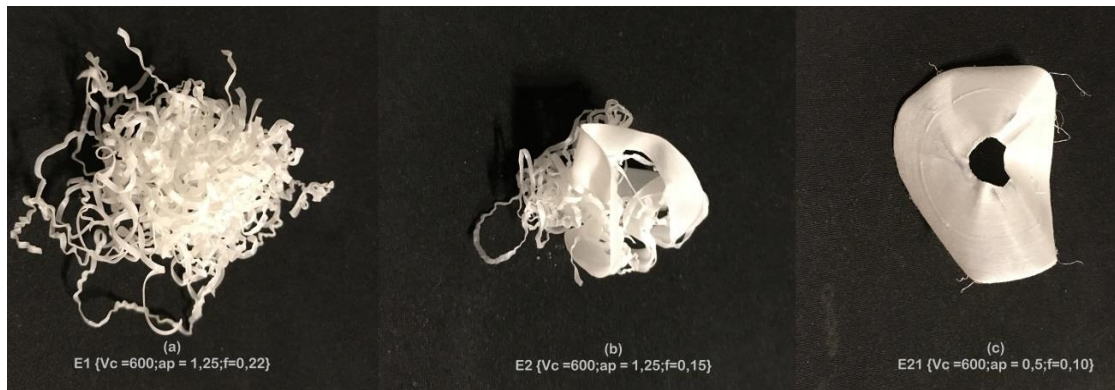
**Gráfico 1 - Médias das forças medidas**

Já a rugosidade, que foi medida após a usinagem das amostras, sofreu um aumento em seus valores de modo geral com o aumento do avanço.



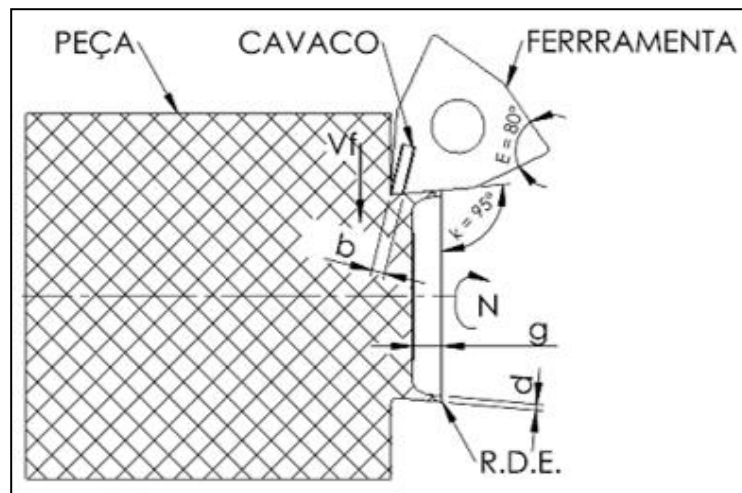
**Gráfico 2 - Valores de rugosidade**

É possível perceber pontos fora do padrão nas medições tanto de forças como de rugosidade. Para identificar o que ocasionou isso, foi colocada uma filmadora fixada na torre do torno CNC, gravando o processo. Assim foi verificada a formação irregular do cavaco, que em certos parâmetros, principalmente para avanços menores, causava a formação de um “anel”. A Figura 11 compara as três formas de cavaco obtidas nos ensaios. Concluiu-se então que essa forma de cavaco influenciava nas forças resultantes no corte e consequentemente no acabamento da peça.



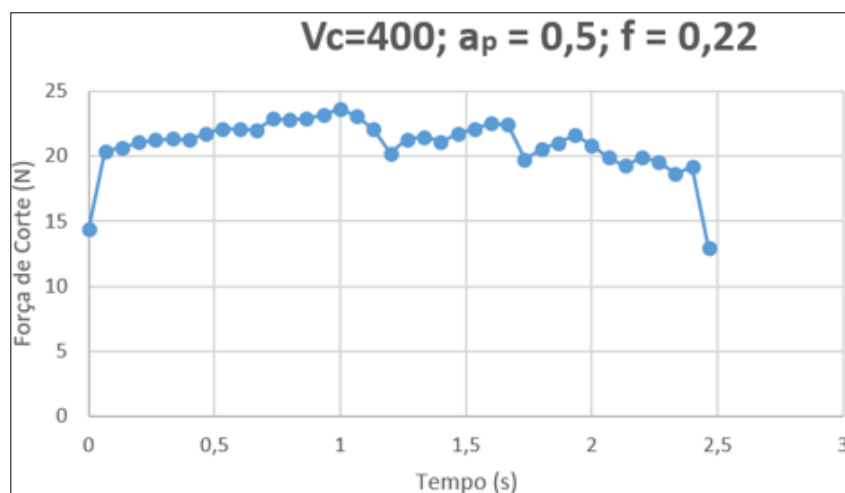
**Figura 11 – Formas de cavaco obtidas nos ensaios**

A maneira como é formado esse cavaco é o principal responsável pelo aumento nas forças. Foi observado o dobramento do material sobre a face lateral da pastilha, formando um perfil de “xícara”, sem se desprender da peça, como ilustra a Figura 12. O material dobrado sobre a pastilha provoca maior resistência contra o avanço da ferramenta, justificando valores mais elevados de força para valores menores de avanço  $f$ .



**Figura 12 - Dobramento do material**

Ao analisar os valores da força de corte  $F_c$  durante o dobramento do cavaco, foi observado um aumento gradual da força, acompanhando o aumento de  $g$ . Em seguida há sucessivas quedas e ascensões, acompanhando também a sequência de rompimentos do anel e reinícios do dobramento. Vide Gráfico 3.



### Gráfico 3 - Força de Corte durante dobramento

## 6. CONCLUSÕES

Apesar das dificuldades na fabricação das ferramentas do tipo bits e pastilhas utilizando geometrias dedicadas aos polímeros, os ensaios utilizando as mesmas serão realizados futuramente.

A partir dos ensaios utilizando a ferramenta comercial para metais, se obteve valores já esperados de esforços de corte e da rugosidade final da peça quando se utiliza ferramentas dedicadas, como já reportados na literatura específica. Porém, a formação irregular do cavaco apresentou grande influência sobre os esforços e a rugosidade sobretudo para valores menores de avanço  $f$ , elevando o valor de ambos.

## 7. REFERÊNCIAS

Da Costa, D. D.; Lajarin, S. F. Comparison of cranioplasty implants produced by machining and by casting in a gypsum mold. International journal of advanced manufacturing technology. 2012, v. 58, n. 1, p. 1-8.

Stemmer, Caspar Erich. Ferramentas de Corte I 3ª Ed. 1993. Editora da UFSC

Kobayashi A. Machining of Plastics. 1967, McGraw-Hill, New York.

Kurtz, S.M., Muratoglu, O.K., Evans, M., Edidin, A.A. Advances in the processing, sterilization, and crosslinking of ultra-high molecular weight polyethylene for total joint arthroplasty. 1999

## 8. RELATÓRIO DE ATIVIDADES

Pela relevância do tema no atual cenário da engenharia, os envolvidos na pesquisa optaram por apresentar a primeira etapa dessa pesquisa, sintetizada na forma de um artigo, no 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, com o título de AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DO POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR (UHMWPE) (COBEF2017-1199) [O que precisa de alteração?], que ocorreu entre os dias 26 e 29 de junho de 2017, na cidade de Joinville -SC.

Esse é um evento nacional na área de Engenharia de Fabricação, promovido pela Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM). Tem como missão proporcionar um amplo fórum para apresentações e discussões críticas dos novos resultados da pesquisa básica e aplicada a tecnologias de fabricação.



Figura 13 – Certificado de Apresentação