

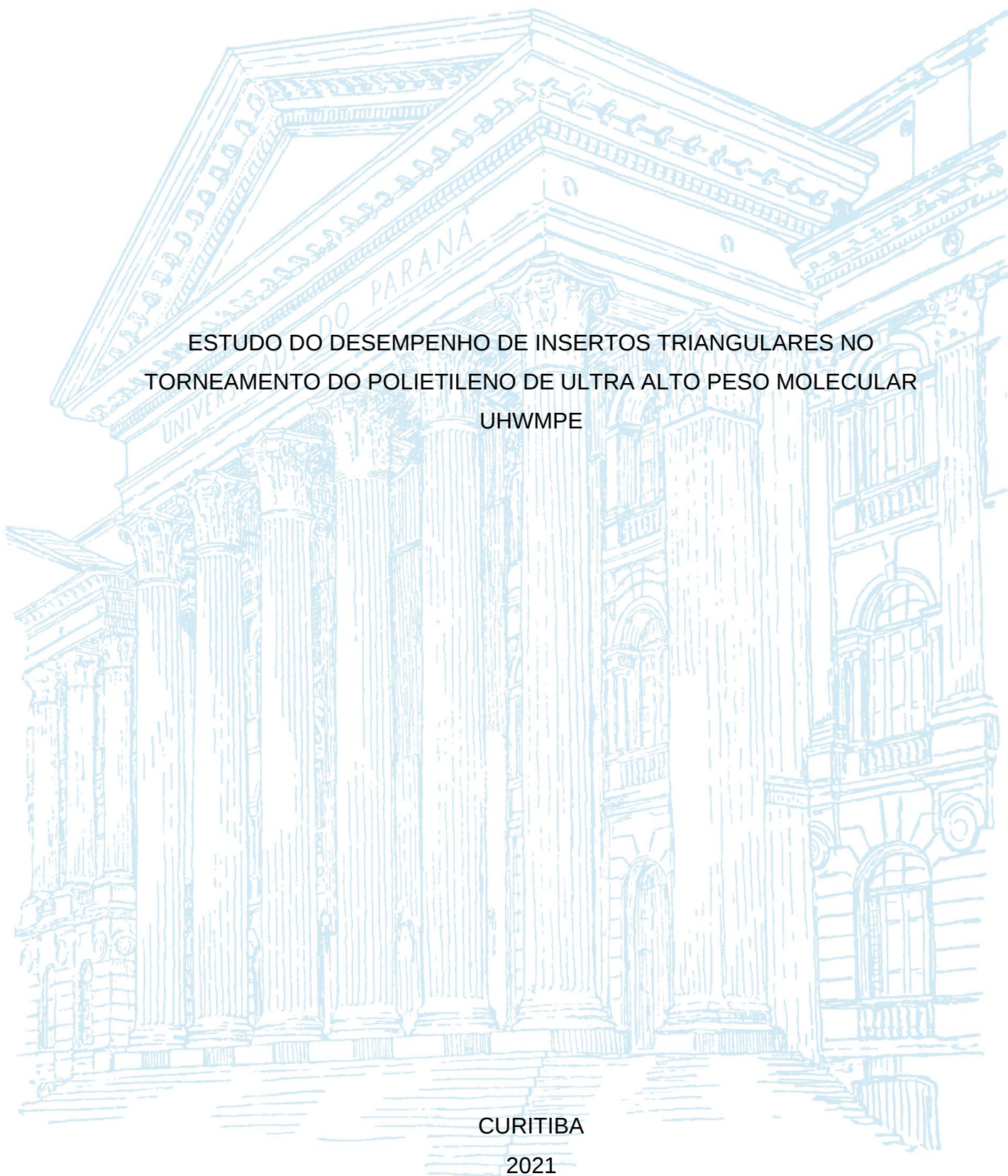
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS PETZOLD BARBOSA LIMA

ESTUDO DO DESEMPENHO DE INSERTOS TRIANGULARES NO
TORNEAMENTO DO POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR
UHMWPE

CURITIBA

2021



LUCAS PETZOLD BARBOSA LIMA

ESTUDO DO DESEMPENHO DE INSERTOS TRIANGULARES NO
TORNEAMENTO DO POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR
UHMWPE

TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Claudimir José Rebeyka

CURITIBA

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

No dia seis de dezembro do ano de dois mil e vinte e um, o aluno LUCAS PETZOLD BARBOSA LIMA (GRR20168108), regularmente matriculado na disciplina TMEC045 – Trabalho de Fim de Curso II, sob a orientação do Prof. Claudimir José Rebeyka, cumprindo o regulamento da disciplina, apresentou publicamente e de forma remota via plataforma Teams, o seu trabalho de graduação com o título: “Estudo do desempenho de insertos triangulares no torneamento do polietileno de ultra alto peso molecular UHWMPE”

A avaliação foi realizada pela seguinte Banca de professores:

Prof. Claudimir José Rebeyka (DEMEC/UFPR - Orientador)	Nota: 100
Prof. Dalberto Dias da Costa (DEMEC/UFPR)	Nota: 100
Prof. Harrison Lourenço Corrêa (DEMEC/UFPR)	Nota: 100
O trabalho foi considerado APROVADO	Média final: 100

Nada mais havendo a tratar, foi dada por encerrada a reunião, sendo a presente Ata assinada eletronicamente pelos participantes.



Documento assinado eletronicamente por **HARRISON LOURENCO CORREA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/12/2021, às 20:20, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **DALBERTO DIAS DA COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/12/2021, às 20:20, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **CLAUDIMIR JOSE REBEYKA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/12/2021, às 20:22, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **LUCAS PETZOLD BARBOSA LIMA, Usuário Externo**, em 06/12/2021, às 20:24, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **4100401** e o código CRC **56E92243**.

Este Trabalho é dedicado à minha mãe Cristina, ao meu pai Daniel e aos meus irmãos Daniel e Pedro, que me apoiaram do início ao fim, e nos momentos mais difíceis.

Também o dedico ao meu orientador, Claudimir José Rebeyka, por sua experiência, competência e reconhecimento.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares e amigos, que sempre estiveram ao meu lado e colaboram com a minha formação.

Ao orientador, Professor Dr. Claudimir José Rebeyka e a todos os Professores que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

Os parâmetros de corte, bem como a geometria da ferramenta de usinagem, possuem influência direta sobre a rugosidade da peça usinada e a força de corte necessária para que esse processo ocorra. Apesar do vasto conhecimento sobre a influência desses fatores na usinagem de materiais metálicos, quando se trata de materiais poliméricos, esses conhecimentos são menos difundidos, devido à escassez de trabalhos que tratam do tema. O objetivo do presente trabalho é realizar o estudo dos parâmetros de corte e do raio de ponta sobre a rugosidade superficial e a força de corte no torneamento do polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) com insertos comerciais triangulares recomendados para usinagem de materiais não-ferrosos. Também está no escopo do trabalho, realizar a avaliação do cavaco gerado nos experimentos e classificá-los segundo a norma ABNT NBR ISO 3685 (2017). As principais conclusões obtidas ao final do trabalho foram as seguintes: com o aumento dos parâmetros avanço e profundidade de corte a tendência é de o cavaco gerado passar do formato de fita para o formato helicoidal; conforme verificado na literatura, o aumento do raio de ponta da ferramenta acarreta em um aumento da força de corte e; modelos teóricos para cálculo da rugosidade média possuem resultados próximos aos reais quando se trata da usinagem do UHMWPE com os insertos em questão.

Palavras-chave: Usinagem. Torneamento. UHMWPE. Força de corte. Rugosidade.

ABSTRACT

The cutting parameters, as well as the machining tool geometry, have a direct influence on the roughness of the machined part and the cutting force required for this process to occur. Despite the vast knowledge about the influence of these factors on the machining of metallic materials, when it comes to polymeric materials, this knowledge is less widespread, due to the scarcity of studies dealing with the subject. The objective of the following work is to study the cutting parameters and nose radius on the surface roughness and cutting force when turning ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) with triangular commercial inserts recommended for machining non-ferrous materials. It is also within the scope of the work to carry out the evaluation of the chips generated in the experiments and classify them according to the ABNT NBR ISO 3685 (2017) standard. The main conclusions reached at the end of the work were the following: with the increase of the advance and cutting depth parameters, the tendency is for the generated chip to change from the tape format to the helical format; as verified in the literature, the increase in the tool nose radius leads to an increase in the cutting force and; Theoretical models for calculating the average roughness have results close to real ones when it comes to machining the UHMWPE with the inserts in question.

Keywords: Machining. Turning. UHMWPE. Cutting Force. Roughness.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PRINCIPAIS GRANDEZAS DOS PROCESSOS DE TORNEAMENTO.	23
FIGURA 2 - EMPREGO DE RAIO DE CURVATURA SOBRE A QUINA DA FERRAMENTA DE CORTE	25
FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÃO DA FORMA DOS CAVACOS DE ACORDO COM A ISO 3685:2017	27
FIGURA 4 – FORÇAS PRESENTES NO TORNEAMENTO	28
FIGURA 5 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA RUGOSIDADE MÉDIA.....	30
FIGURA 6 - TORNO QUICK TURN NEXUS 100-II	31
FIGURA 7 - DESENHO TÉCNICO DO CORPO DE PROVA UTILIZADO NO EXPERIMENTO	32
FIGURA 8 - MONTAGEM DA MÁQUINA UTILIZADA DURANTE O EXPERIMENTO	32
FIGURA 9 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DE FORÇA	33
FIGURA 10 – MONTAGEM DA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE	36
FIGURA 11 - CAVACOS OBTIDOS COM $A_P = 1,2R_E$	38
FIGURA 12 - CAVACOS OBTIDOS COM $A_P = 2R_E$	38

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - FORÇA DE CORTE MEDIDA PELO DINAMÔMETRO	40
GRÁFICO 2 - FORÇA DE CORTE NO TORNEAMENTO DO UHMWPE	40
GRÁFICO 3 - FORÇA DE CORTE PARA $A_P = 1,2R_E$	42
GRÁFICO 4 - FORÇA DE CORTE PARA $A_P = 2R_E$	42
GRÁFICO 5 - RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO DO UHMWPE	43
GRÁFICO 6 - COMPARATIVO ENTRE RUGOSIDADE MÉDIA TEÓRICA E EXPERIMENTAL	45

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS UTILIZADOS EM CADA ENSAIO.....	35
TABELA 2 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS	37
TABELA 3 - ERRO RELATIVO ENTRE RUGOSIDADE MÉDIA TEÓRICA E EXPERIMENTAL	44

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

UHMWPE	- Polietileno de ultra alto peso molecular
PEBD	- Polietileno de baixa densidade
PEAD	- Polietileno de alta densidade
PELBD	- Polietileno Linear de baixa densidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 METODOLOGIA.....	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 TIPOS DE POLIETILENO	20
2.1.1 Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE)	20
2.1.2 Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE).....	20
2.1.3 Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE).....	21
2.1.4 Polietileno de ultrabaixa densidade (PEUBD ou ULDPE)	21
2.1.5 Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWPE)	22
2.2 GRANDEZAS NOS PROCESSOS DE USINAGEM.....	22
2.2.1 Movimento de corte	23
2.2.2 Velocidade de corte (v_c)	23
2.2.3 Movimento de avanço	24
2.2.4 Avanço (f)	24
2.2.5 Velocidade de avanço (v_f)	24
2.2.6 Profundidade de corte (a_p)	24
2.2.7 Raio de quina de ferramenta (r_ϵ)	24
2.3 CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE CAVACOS	26
2.4 FORÇA DE CORTE	27
2.5 RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	28
2.5.1 Rugosidade Média (R_a)	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1 AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO CAVACO GERADO	37
4.2 AVALIAÇÃO DA FORÇA DE CORTE	39
4.2.1 Determinação da pressão específica de corte do UHMWPE	41
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE RUGOSIDADE MÉDIA TEÓRICA E RUGOSIDADE MÉDIA EXPERIMENTAL	43

5 CONCLUSÕES	46
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
REFERÊNCIAS.....	48
APÊNDICE 1 – GRÁFICOS FORÇA DE CORTE X TEMPO, IMAGENS DOS EXPERIMENTOS E CAVACOS GERADOS.....	50
ANEXO 1 – INSERTO TNGG 160402-M3N-P	68
ANEXO 2 – INSERTO TNGG 160404-M3N-P	69
ANEXO 3 – INSERTO TNGG 160408-M3N-P	70

1 INTRODUÇÃO

Segundo a norma DIN 8580, pode-se aplicar o termo usinagem a todos os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco. E, define-se cavaco como a porção de material retirada da peça pela ferramenta, ele se caracteriza por apresentar forma irregular.

O torneamento é um processo de usinagem de geometria definida que permite a fabricação de peças de revolução. Ele opera com a peça girando fixada a uma placa com 3 ou 4 castanhas e, às vezes, fixada também entre contra pontas de centragem enquanto uma das diversas ferramentas de corte realiza, através de movimento de translação, a usinagem da peça, ou seja, a remoção do material na forma de cavaco. As principais operações do torneamento são as seguintes: faceamento, sangramento, rosqueamento, torneamento interno, externo e curvilíneo.

Tornos mecânicos possuem elevado consumo energético em decorrência do uso de motores elétricos para seu funcionamento. A força de corte de uma operação de torneamento pode ser determinada tanto experimentalmente, ou seja, através de instrumentos de medição, quanto teoricamente, através do uso de equações. A grande desvantagem de modelos analíticos para cálculo desses parâmetros é que eles não levam em conta perdas durante o processo, o que pode gerar grandes diferenças com o que ocorre na realidade.

Polímeros são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares. Eles possuem unidades químicas ligadas por covalências, repetidas regularmente ao longo da cadeia, denominadas meros. (MANO; MENDES, 1999)

Os polímeros, aqueles derivados de animais e plantas, são utilizados pela humanidade há diversos séculos, alguns exemplos são a madeira, borracha, algodão, couro e lã. Outros polímeros como enzimas, proteínas, amidos e celulose são essenciais para processos biológicos e fisiológicos de animais e plantas. Estes são classificados como polímeros naturais. Com o advento da pesquisa científica foi possível a determinação de estruturas moleculares desse grupo de materiais, bem como a sintetização de inúmeros polímeros através de moléculas orgânicas menores. Muitos plásticos, borrachas e materiais fibrosos que são utilizados, são polímeros sintéticos. Os materiais sintéticos podem ser produzidos com baixo custo e suas propriedades podem ser modificadas para que possuam desempenho superior aos

seus semelhantes naturais. Em determinadas aplicações peças de madeira ou até mesmo as metálicas foram substituídas por materiais poliméricos que possuem propriedades satisfatórias e baixo custo. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016)

Nos últimos anos o campo de aplicação de materiais poliméricos vem aumentando consideravelmente. Materiais plásticos geralmente são fabricados por processos de moldagem com a extrusão, injeção ou compressão. Processos de usinagem de polímeros se tornam necessários quando deseja-se produzir em pequenas quantidades, já que o custo de moldes e matrizes são elevados, ou quando se tem necessidade de uma geometria complexa ou precisa. (FETECAU et al., 2008).

1.1 JUSTIFICATIVA

Os materiais poliméricos possuem, em geral, boas propriedades mecânicas, custo baixo e são leves. Por esse motivo, eles vêm substituindo os materiais metálicos em diversas aplicações. Quando se deseja obter elevada precisão dimensional e baixa rugosidade superficial, processos de usinagem de polímeros são preferidos. Estudos referentes à usinagem de materiais poliméricos mostram que o comportamento varia de acordo com o material, logo, o efeito dos dados de corte deve ser verificado material a material. A literatura sobre essa área é pouco vasta e carece de uma investigação mais ampla. (JAGTAP; MANDAVE, 2015).

Tendo em vista a importância dos materiais poliméricos nas mais diversas aplicações da engenharia, esse trabalho tem como justificativa o aprofundamento dos estudos referentes à usinagem de polímeros, levando em conta a avaliação da geometria da ferramenta de corte bem como os dados de corte.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar o desempenho de insertos triangulares no torneamento do polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE).

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Verificar a influência da variação do raio de ponta do inserto de torneamento, bem como dos parâmetros de corte sobre a qualidade do acabamento superficial da peça usinada em UHMWPE através da medição de rugosidade dos corpos de prova;
- 2) Classificar os cavacos provenientes dos processos de usinagem seguindo a norma ABNT NBR ISO 3685 (2017);
- 3) Avaliar a força de corte, mediante instrumentação da máquina-ferramenta com dinamômetro piezoelétrico para coleta de dados de forças de usinagem;
- 4) Determinar o valor da pressão específica de corte para o UHMWPE;
- 5) Medir a rugosidade resultante e comparar os resultados experimentais com valores teóricos.

1.3 METODOLOGIA

Para realização do seguinte trabalho foram estudados três insertos, para torneamento de materiais não-ferrosos, com diferentes raios de ponta, a saber: TNGG 160402-M3N-P, TNGG 160404-M3N-P, TNGG 160408-M3N-P. Foram confeccionados o total de 12 corpos de prova em polietileno de ultra alto peso molecular, cada um com 3 regiões para usinagem, em cada uma dessas regiões foi aplicada uma condição de corte diferente. Resultando em 18 condições de usinagem diferentes realizadas em 6 corpos de prova e repetidas em outros 6 corpos de prova. O torno CNC utilizado (modelo QTN 100II da fabricante Mazak) foi instrumentado com dinamômetro piezoelétrico para coleta de dados de forças de usinagem. Posteriormente aos ensaios foram avaliados três itens diferentes: o cavaco proveniente de cada processo, a força de corte e a rugosidade superficial. Desta forma, pôde-se obter os dados necessários para atingir os objetivos desse trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O desempenho durante os processos de usinagem é principalmente afetado pelas propriedades dos materiais usinados. Estas propriedades dos materiais podem ser expressas através de sua usinabilidade. A usinabilidade indica a relativa facilidade ou dificuldade com que um determinado material pode ser usinado, utilizando uma ferramenta e parâmetros de corte adequados. A usinabilidade de um material pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem do material, em relação a outro tomado como referência ou padrão. São consideradas propriedades de usinagem de um material aquelas que possuem efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem, tais como vida da ferramenta, força de corte, acabamento da superfície da peça e a temperatura de corte. (GROOVER, 1996).

De modo geral, os polímeros podem, assim como os materiais metálicos, passar por processos de usinagem tanto de geometria definida (fresamento, furação, torneamento) quanto de geometria indefinida (retificação, polimento). Entretanto não se pode-se basear na usinagem de metais para prever a usinagem de materiais poliméricos, visto que estes possuem características demasiadamente diferentes. É preciso levar em consideração as características que diferenciam os polímeros de materiais metálicos para que se obtenha um resultado satisfatório em sua usinagem. (MICHAELI, 1995).

Em decorrência da baixa condutividade térmica dos polímeros, a maior parte do calor produzido devido ao atrito entre cavaco e ferramenta e entre ferramenta e peça tem que ser removida pela ferramenta de corte. Isso resulta em aumento de temperatura, o que pode afetar o processo de usinagem através do aumento do desgaste da ferramenta e perda de qualidade superficial da peça usinada. (STARES, 2010).

O comportamento dos materiais poliméricos durante processos de usinagem depende principalmente de suas propriedades mecânicas, térmicas e reológicas. Ou seja, qualquer avaliação das características de usinagem deve considerar as propriedades do material em a ser usinado. Cada tipo de polímero possui uma geometria de corte específica para otimização de desempenho e produtividade no decorrer do processo de usinagem. (KOBAYASHI; HIRAKAWA, 1984).

Dentre os polímeros de engenharia mais utilizados podem-se destacar os polipropilenos, o policloreto de vinila e polietilenos, sendo esses últimos os mais utilizados em aplicações reais.

2.1 TIPOS DE POLIETILENO

2.1.1 Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE)

O PEBD tem uma combinação única de propriedades: boa tenacidade, alta resistência ao impacto e flexibilidade, boa processabilidade, estabilidade e excelentes propriedades elétricas. Por outro lado, esse polímero possui uma baixa permeabilidade se comparado a outros materiais poliméricos.

O PEBD pode ser processado por extrusão, moldagem por sopro e moldagem por injeção. Suas aplicações são variadas, como filmes destinados a embalagens de alimentos líquidos e sólidos, embalagens industriais e agrícolas, embalagens para produtos farmacêuticos e hospitalares, brinquedos e utilidades domésticas, além de servir de revestimento de fios e cabos, tubos e mangueiras. (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003).

2.1.2 Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE)

O peso molecular tem influência sobre as propriedades do PEAD, principalmente em decorrência do seu efeito na cinética de cristalização, cristalinidade final e ao caráter morfológico da amostra. O PEAD de baixo peso molecular é frágil e que falha sob baixas deformações, sem que ocorra estrição no ensaio de tração. Em contrapartida, o PEAD comercial apresenta o processo de estrição durante o mesmo ensaio. Além disso, o peso molecular também apresenta influência sobre a resistência do material. Amostras de peso molecular baixo são frágeis, mas conforme esse fator é aumentado, nota-se um aumento da resistência ao impacto.

O PEAD é utilizado em diversas aplicações na indústria de transformação de plásticos, podendo ser processado por moldagem por sopro, extrusão e injeção. Pelo processo de sopro, destaca-se a confecção de bombonas, tanques e tambores, em que são necessárias resistência ao impacto, ao empilhamento e a produtos químicos. Em processos de extrusão é utilizado para fabricação de fios eletrônicos, sacos para

congelados, revestimento de tubulações metálicas, tubos para rede de saneamento e de distribuição de gás, emissários de efluentes sanitários e químicos, dutos para mineração e dragagem, barbantes de costura, sacos para lixo e sacola de supermercados. (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003).

2.1.3 Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE)

O polietileno linear de baixa densidade possui ramificações de cadeia curtas, o que influencia sobre sua morfologia e propriedades físicas como rigidez, densidade, dureza e resistência à tração. Isso se dá, pois, a estrutura ramificada de algumas regiões das moléculas não permite um arranjo completamente ordenado das cadeias.

A maior resistência ao cisalhamento e maior suscetibilidade à fratura do material fundido fazem com que o processamento do PELBD seja mais complicado em relação ao PEBD. Porém, as ótimas propriedades mecânicas e óticas de filmes do polímero em questão compensam a dificuldade na realização de seu processamento.

O PELBD é um termoplástico com alta capacidade de selagem a quente, ele é muito utilizado na confecção de embalagens de itens de primeira necessidade como fraldas descartáveis e absorventes, lonas em geral, brinquedos, artigos hospitalares e farmacêuticos e revestimentos de fios e cabos. Pelo processo de extrusão de filmes tubulares, é fornecido material para fabricação de embalagem de pão. Em mistura com o PEAD ou com PEBD, esse polímero é usado em sacaria industrial, embalagem para ração animal e filme agrícola. A extrusão de filmes planos fornece produtos para utilização em plástico bolha. (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003)

2.1.4 Polietileno de ultrabaixa densidade (PEUBD ou ULDPE)

O polietileno de ultrabaixa densidade é um material de densidade aproximadamente $0,865 \text{ g/cm}^3$ e possui maior resistência, mais flexibilidade e melhores propriedades ópticas se comparado ao PELBD. Foram caracterizadas duas séries do PEUBD e constatou-se que a distribuição de peso molecular dele é mais estreita se comparada a do PEAD e o calor necessário para fusão é menor que do PEBD. (CARR; FEGER, 1993).

A principal aplicação do PEUBD é como resina modificadora, principalmente para o PEAD, PEBD e PP. A adição de PEUBD aos polietilenos de alta e baixa

densidade, bem como para o polipropileno melhora a resistência ao impacto, ao rasgamento e a flexibilidade desses materiais.

2.1.5 Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWPE)

O polietileno de ultra alto peso molecular é um polietileno de alta densidade ($0,93-0,94 \text{ g/cm}^3$), branco e opaco, cuja temperatura de transição vítrea está entre -100°C e -125°C e temperatura de fusão de 135°C . Sua cristalinidade é de aproximadamente 45%.

Esse material é extremamente resistente a uma variedade de produtos químicos (ácidos, álcalis, solventes, combustíveis, detergentes e oxidantes). Esse material é quase totalmente inerte, o que o torna interessante para utilização nos mais variados ambientes, como ambientes corrosivos ou agressivos sob temperaturas moderadas.

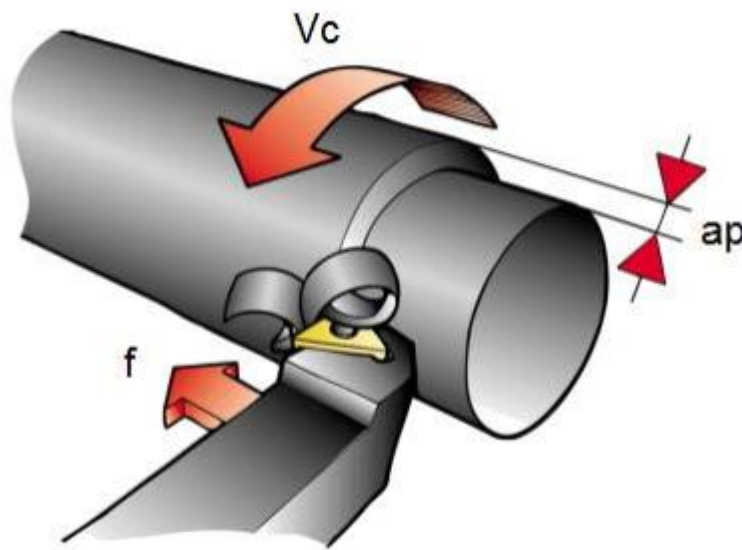
O UHMWPE é obtido através de um processo que possibilita a obtenção de polímeros com peso molecular no intervalo de 2 a 8 milhões de g/mol, por volta de dez vezes mais que as resinas já consideradas de alto peso molecular. Isso faz com que o material possua uma viscosidade tão elevada em estado líquido que seu índice de fluidez tende a zero. Tal fato faz com que o UHMWPE não possa ser processado por meios convencionais como injeção, sopro ou extrusão. Para seu processamento são utilizados os processos de prensagem e extrusão por pistão. Em ambos, obtém-se um produto semi acabado que será usinado para obtenção de suas medidas finais. As características de resistência à abrasão, ao impacto e a produtos químicos, bem como sua auto lubrificação, baixo coeficiente de atrito, absorção de ruídos tornam este polímero adequado para diversas aplicações. (SALLES; CORRÊA; GONÇALVES, 2003)

O UHMWPE pode ser aplicado em rotores de bombas, correias transportadoras, mancais, raspadores, revestimentos, fibras de alta resistência e peças utilizadas para reposição da articulação do joelho em artroplastia, nesse caso a usinagem se torna o principal processo de fabricação. (DIAS DA COSTA et al., 2019)(SALLES; CORRÊA; GONÇALVES, 2003).

2.2 GRANDEZAS NOS PROCESSOS DE USINAGEM

A Figura 1 apresenta as principais grandezas dos processos de torneamento cilíndrico externo, são elas: avanço (f), profundidade de corte (a_p) e velocidade de corte (v_c). Essas grandezas exercem grande influência sobre a força de corte e no acabamento superficial da peça usinada. Cada uma dessas grandezas, bem como as demais grandezas importantes aos processos de usinagem, serão detalhadas mais à frente.

FIGURA 1 - PRINCIPAIS GRANDEZAS DOS PROCESSOS DE TORNEAMENTO.



FONTE: Adaptado de Kennametal (2016)

2.2.1 Movimento de corte

Refere-se ao movimento principal produzido manualmente ou pela máquina-ferramenta, com o objetivo de deslocar a ferramenta em relação à peça, forçando o material da peça sobre a face da ferramenta. Em processos de torneamento, o movimento de corte é gerado pela rotação da peça. O movimento de corte só pode remover material sob forma de cavaco por mais de uma rotação ou curso, caso haja um movimento de avanço. (STEMMER, 1993).

2.2.2 Velocidade de corte (v_c)

A velocidade de corte é resultado do deslocamento da ferramenta perante a peça que se está usinando. A velocidade de corte é a velocidade tangencial

instantânea resultante da rotação da ferramenta em relação à peça, para as operações do tipo torneamento, fresamento ou furação, onde os movimentos de avanço e corte ocorrem simultaneamente. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

2.2.3 Movimento de avanço

É o movimento produzido manualmente ou pela máquina-ferramenta, com o objetivo de gerar movimento relativo entre a peça e ferramenta de corte, o qual, somado ao movimento de corte, leva à remoção repetida ou contínua de cavacos e à geração de uma superfície usinada com as características geométricas e dimensionais almejadas. Este movimento pode ser efetuado por degraus ou continuamente. As grandezas que se relacionam ao movimento de avanço são afetadas pela grandeza “ f ”, o avanço (do inglês, “feed”). (STEMMER, 1993).

2.2.4 Avanço (f)

É o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta de corte.

2.2.5 Velocidade de avanço (v_f)

A velocidade de avanço é, em operações de torneamento, o produto do avanço, pela rotação da peça.

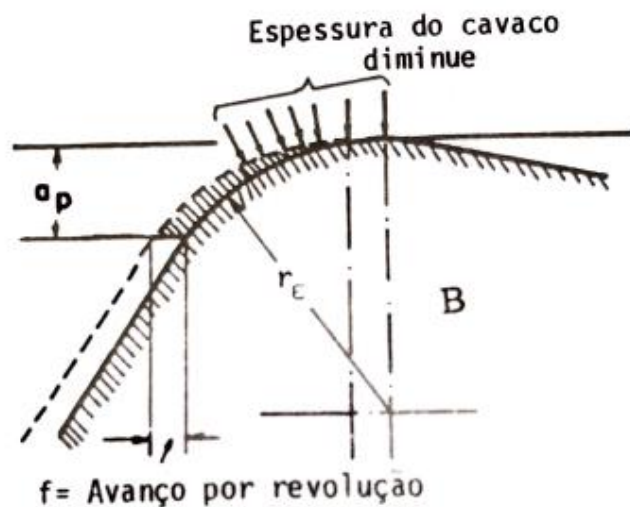
2.2.6 Profundidade de corte (a_p)

É a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No torneamento cilíndrico e de faceamento, fresamento e retificação frontal, o a_p é denominado profundidade de usinagem. No brochamento, fresamento e retificação tangencial, é denominado largura de usinagem. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

2.2.7 Raio de quina de ferramenta (r_ϵ)

O raio de quina da ferramenta de usinagem é aquele que une o gume principal com o secundário. A utilização de uma curva de concordância na quina promove a redução da espessura do cavaco. Caso o raio seja muito pequeno essa redução se dá somente na porção final do cavaco, caso contrário, quando se tem um raio grande, existe a redução gradual da espessura do cavaco, o que acarreta na diminuição da pressão específica sobre a quina da ferramenta e do calor gerado na mesma, conforme pode ser observado na FIGURA 2. Elevados raios de concordância possuem a inconveniência de gerar vibrações durante o processo de corte, isso se dá em decorrência de alguns fatores como o comprimento excessivo de contato entre a aresta de corte e peça e a espessura não uniforme do cavaco. Ademais, o raio do gume provoca um aumento de 5% a 20% na força de corte necessária para a usinagem do material. (STEMMER, 1993).

FIGURA 2 - EMPREGO DE RAIO DE CURVATURA SOBRE A QUINA DA FERRAMENTA DE CORTE



FONTE: Stemmer (1993)

O aumento da superfície de contato entre o par cavaco-ferramenta possui algumas vantagens. Ela promove uma diminuição do calor gerado na ponta da ferramenta de corte e diminui as tensões atuantes sobre a mesma. (PARIDA; MAITY, 2017).

2.3 CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE CAVACOS

No que diz respeito à tecnologia da usinagem, pode-se classificar os cavacos em três tipos básicos: o cavaco contínuo, o cavaco cisalhado e o cavaco de ruptura. (STEMMER, 1993)

No cavaco contínuo, o material diante da ferramenta é recalcado até que escorrega ao longo do plano de cisalhamento e passa a formar parte do cavaco que desliza suave e uniformemente sobre a superfície de saída. O cavaco contínuo é geralmente obtido quando se usinam materiais dúcteis com altas velocidades de corte. Também podem ser obtidos com o emprego de refrigeração eficiente durante o processo de corte. (STEMMER, 1993)

No cavaco cisalhado, o material ao escorregar ao longo do plano de cisalhamento, rompe no ponto de maior solicitação mecânica. Essa fissura progride até que ocorra a ruptura parcial ou total do cavaco. Este apresenta-se, em geral, na forma de uma fita contínua, pois efeitos de pressão e temperatura provocam uma solda dos diversos fragmentos. Nesse tipo de cavaco, o processo de usinagem não ocorre de forma ininterrupta e uniforme, como na formação do cavaco contínuo. A força de corte cresce progressivamente com a deformação do material, até que este se rompa. A força de corte cai então bruscamente e o gume reinicia o processo de deformação, repetindo-se o ciclo. O acabamento superficial resultante é de menor qualidade, com algumas ondulações. Existe uma grande tendência de geração de vibrações durante o processo de usinagem, esse efeito indesejado é responsável pelo dano ao acabamento superficial da peça usinada e redução da vida-útil da ferramenta de corte. (STEMMER, 1993)

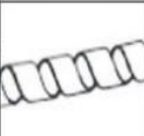
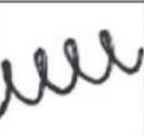
O cavaco de ruptura é aquele produzido durante a usinagem de materiais frágeis, como por exemplo o ferro fundido e o latão. Ele tem a forma de pequenos fragmentos independentes e distintos entre si, gerados principalmente pela ação de tensões principais de tração-compressão. O cavaco se rompe de forma conchoidal, ocorrendo também arrancamentos abaixo da superfície usinada. Nestes tipos de materiais somente é possível obter um bom acabamento superficial através do emprego de ferramentas de corte com afiação correta e baixos avanços. (STEMMER, 1993).

O controle do cavaco produzido é extremamente importante em processo de usinagem. O cavaco do em forma de fita, por exemplo, além de oferecer riscos ao

operador da máquina, pode enrolar-se em torno da peça e/ou ferramenta, dificultando a operação e tornando a superfície usinada de menor qualidade. (AMORIM, 2002).

Os cavacos de cisalhamento e contínuos podem ser qualificados conforme sua forma geométrica, como: em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços. A norma ABNT NBR ISO 3685 (2017) classifica de forma detalhada as formas de cavacos, conforme pode ser observado na FIGURA 3.

FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÃO DA FORMA DOS CAVACOS DE ACORDO COM A ISO 3685:2017

1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

FONTE: ABNT NBR ISO 3685:2017 (2017)

2.4 FORÇA DE CORTE

Em usinagem, a força de corte é aquela que a ferramenta aplica sobre o material para realização do corte. A aresta de corte aplica força com o objetivo de cortar o material e remover o cavaco. O material resiste à penetração do gume cortante até o limite de sua resistência mecânica. A Figura 4 apresenta as forças presentes no processo de torneamento.

Em processos de torneamento a ferramenta é geralmente monocortante e a peça rotaciona em torno do seu próprio eixo. Para calcular a força de corte para o torneamento utiliza-se a EQUAÇÃO 1, apresentada abaixo. (STEMMER, 1993)

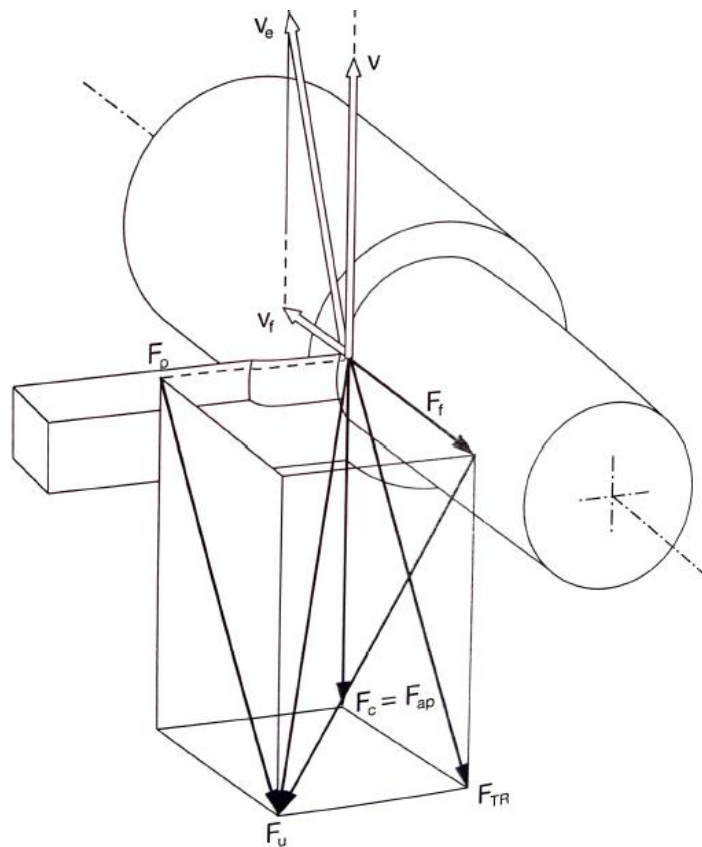
$$F_c = a_p \times f \times K_c \quad (2)$$

Onde:

- F_c = força de corte em processos de torneamento (N);
- a_p = profundidade de corte (mm);
- f = avanço (mm/rot)
- K_c = coeficiente da força específica de corte (N/mm² ou MPa).

O coeficiente da força específica de corte (K_c) representa a relação da força necessária para obtenção de um cavaco com área de seção transversal de 1mm². Esse valor é tabelado e pode ser encontrado em manuais e catálogos de fabricantes de materiais. (REBEYKA, 2016).

FIGURA 4 – FORÇAS PRESENTES NO TORNEAMENTO



FONTE: Adaptado de Rebeyka (2016)

2.5 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Uma grandeza característica de extrema importância na usinabilidade de materiais é a rugosidade superficial da peça usinada. Verifica-se, na prática, que materiais fabricados nas mesmas condições de usinagem, com a mesma ferramenta e máquina-ferramenta, apresentam rugosidades superficiais diferentes. Ou seja, essa grandeza constitui uma propriedade de usinagem que contribui na avaliação do índice de usinabilidade do material. A medida destes parâmetros é realizada com a utilização por aparelhos como o rugosímetro, perfilômetros e perfilógrafos.

Os erros geométricos nas superfícies das peças, provenientes da usinagem, podem ser classificados em desvios macro geométricos, ondulações e desvios micro geométricos.

Os desvios macro geométricos se estendem por toda a superfície testada. São geralmente, admitidos dentro das tolerâncias de usinagem especificadas em projeto.

As ondulações são as séries de desvios regularmente repetidos, de forma próxima à uma senoide e comprimento aproximadamente constante. Essas ondulações resultam de deflexões da peça ou da máquina durante a usinagem, excentricidades da peça, folgas no eixo árvore e nas guias da máquina, operações de desbaste de alto avanço, dentre outros.

Os desvios micro geométricos constituem a rugosidade superficial. Esses desvios são os de maior interesse, uma vez que a rugosidade é avaliada pela altura e características destes. Eles são gerados pelo próprio processo de formação de cavaco, vibrações da ferramenta de corte, aresta postiça, marcas do avanço da ferramenta em operações de acabamento. (FERRARESI, 1970).

2.5.1 Rugosidade Média (R_a)

É o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil de rugosidade da linha média dentro do comprimento de medição. Esta grandeza pode ser definida como a altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta de das áreas delimitadas entre o perfil de rugosidade e a linha média, tendo como comprimento, o comprimento de medição (l_m), conforme mostrado na FIGURA 5. (NUNES, 2021).

FIGURA 5 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA RUGOSIDADE MÉDIA



FONTE: Rodrigues (2012)

A rugosidade média pode ser calculada analiticamente de acordo com o processo de usinagem considerado. Para processos de torneamento, a rugosidade superficial pode ser calculada, em microns, pela EQUAÇÃO 2. Adicionalmente, para o torneamento, a profundidade de corte não exerce influência sobre a rugosidade superficial. (WHITEHOUSE, 1994)

$$Ra = 1000 \times \frac{f^2}{31,2 R_e} \quad (2)$$

Em condições experimentais é muito difícil de se obter os valores calculados através da EQUAÇÃO 2 devido à fatores como vibrações, desgaste da ferramenta, fixação da peça, formação de aresta postiça, dentre outros. (GILLIBRAND; SARWAR; PIERCE, 1996).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A máquina-ferramenta utilizada para realização dos experimentos foi um torno CNC modelo QTN 100II, fornecido pela fabricante Mazak, ela é mostrada na FIGURA 6. O comando numérico utilizado foi o Mazatrol- Nexus que possibilita a programação do movimento de corte com velocidade constante.

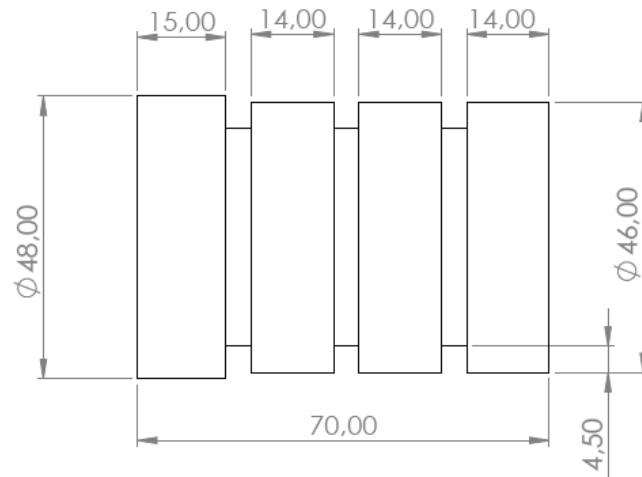
FIGURA 6 - TORNO QUICK TURN NEXUS 100-II



FONTE: Rebeyka (2021)

O material utilizado para realização do experimento foi o UHMWPE. Foram confeccionados 12 corpos de prova cilíndricos e com 3 regiões distintas, separadas por um canal de 4mm de largura, para usinagem em diferentes condições de corte na mesma amostra. Um desenho técnico do corpo de prova pode ser verificado na FIGURA 7.

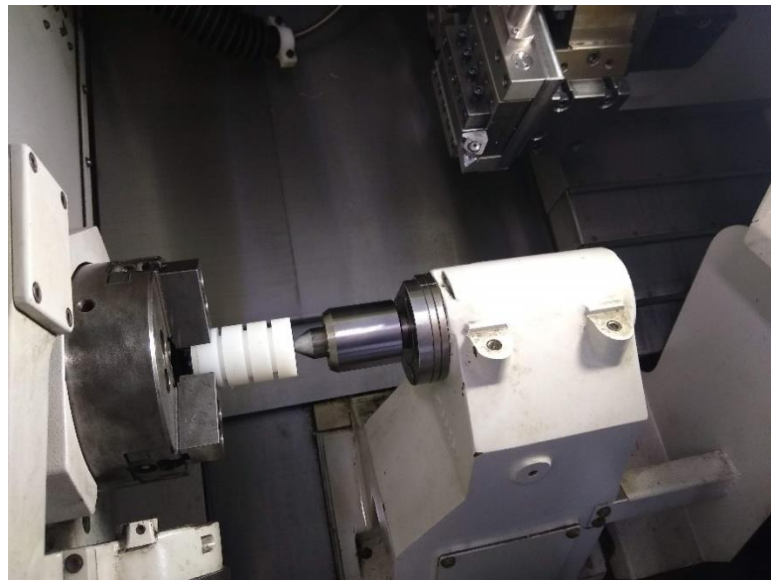
FIGURA 7 - DESENHO TÉCNICO DO CORPO DE PROVA UTILIZADO NO EXPERIMENTO



FONTE: O autor (2021)

Cada corpo de prova foi fixado em placa com 3 castanhas e contra-ponta, para minimizar o efeito de vibrações durante o processo de usinagem. A montagem da máquina pode ser observada na FIGURA 8.

FIGURA 8 - MONTAGEM DA MÁQUINA UTILIZADA DURANTE O EXPERIMENTO



FONTE: O autor (2021)

A máquina também foi instrumentada com dinamômetro piezoelétrico modelo 9129A da marca Kistler, conversor/amplificador de carga (modelo 5070A, marca Kistler), uma placa de conversão analógico/digital (modelo CIO-DAS08, marca

Measuring Computing) e um microcomputador. Os dados brutos foram adquiridos com um programa dedicado, implementado em MS Visual Basic®, a uma taxa de amostragem de 300 Hz, os demais parâmetros utilizados são apresentados na Figura 9. As componentes da força de usinagem foram registradas durante todo o percurso de avanço. Com os valores registrados, pôde-se gerar os gráficos do tipo “Força versus tempo” para todo o percurso de movimentação da ferramenta em relação a peça.

FIGURA 9 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DE FORÇA

Canal	Label	Sensitivity	Unit	Measuring Range	Unit	Filter	Unit/V	
☒	1	Fx	-7.993	pc/N	400	N	300 Hz	40
☒	2	Fy	-4.126	pc/N	400	N	300 Hz	40
☒	3	Fz	-8.068	pc/N	400	N	300 Hz	40
☐	4	Ch4		pc/N		N		0

Taxa de Amostragem (Hz) -

Número de Leituras do ensaio -

Salvar em

Arquivo

Responsável

FONTE: O autor (2021)

As ferramentas de corte utilizadas nos experimentos foram os modelos TNGG 160402-M3N-P, TNGG 160404-M3N-P e TNGG 160408-M3N-P. Pelo sistema de identificação de insertos, pode-se definí-lo com um inserto de geometria triangular, com ângulo de folga nulo, com quebra-cavacos em ambos os lados do inserto, comprimento da aresta de corte de 16mm, espessura de 4,76mm, raios de ponta de 0,2, 0,4 e 0,8mm respectivamente. Esses insertos foram fornecidos pela ISCAR e o próprio fabricante os recomenda para usinagem de acabamento em ligas de alumínio e outros materiais não-ferrosos. Possui corte macio e baixas forças de corte, o que minimiza a formação de aresta postiça durante o processo de usinagem. Nos anexos 1 a 3, pode-se visualizar o desenho dos 3 insertos utilizados. Os insertos foram montados no porta-ferramentas MTJNL-2020K16H4 NG2, fornecido pela Kennametal.

A TABELA 1 apresenta os parâmetros de cada experimento realizado, bem como suas repetições. Nela R_e representa o raio de ponta da ferramenta utilizada, f é o avanço e a_p é a profundidade de corte.

A velocidade de corte foi mantida constante em todos os experimentos. O valor utilizado foi de 250 m/min, conforme resultados satisfatórios obtidos em experimentos anteriores.

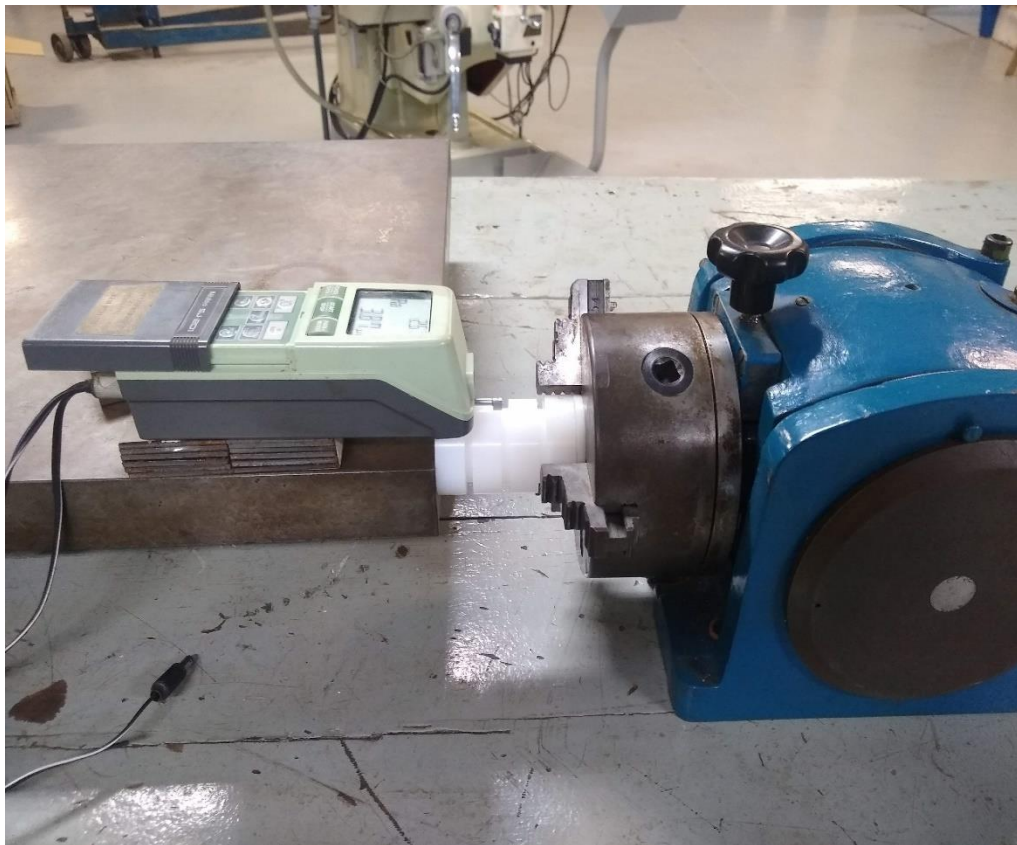
TABELA 1 - PARÂMETROS UTILIZADOS EM CADA ENSAIO

Corpo de prova	r_e [mm]	f [mm/rev]	ap [mm]	ap/Re	f^2/Re
E1.1	0.2	0.05	0.24	1.2	0.0125
E1.2	0.2	0.1	0.24	1.2	0.05
E1.3	0.2	0.15	0.24	1.2	0.1125
E2.4	0.2	0.05	0.4	2	0.0125
E2.5	0.2	0.1	0.4	2	0.05
E2.6	0.2	0.15	0.4	2	0.1125
RE1.1	0.2	0.05	0.24	1.2	0.0125
RE1.2	0.2	0.1	0.24	1.2	0.05
RE1.3	0.2	0.15	0.24	1.2	0.1125
RE2.4	0.2	0.05	0.4	2	0.0125
RE2.5	0.2	0.1	0.4	2	0.05
RE2.6	0.2	0.15	0.4	2	0.1125
E3.7	0.4	0.1	0.48	1.2	0.025
E3.8	0.4	0.2	0.48	1.2	0.1
E3.9	0.4	0.3	0.48	1.2	0.225
E4.10	0.4	0.1	0.8	2	0.025
E4.11	0.4	0.2	0.8	2	0.1
E4.12	0.4	0.3	0.8	2	0.225
RE3.7	0.4	0.1	0.48	1.2	0.025
RE3.8	0.4	0.2	0.48	1.2	0.1
RE3.9	0.4	0.3	0.48	1.2	0.225
RE4.10	0.4	0.1	0.8	2	0.025
RE4.11	0.4	0.2	0.8	2	0.1
RE4.12	0.4	0.3	0.8	2	0.225
E5.13	0.8	0.2	0.96	1.2	0.05
E5.14	0.8	0.4	0.96	1.2	0.2
E5.15	0.8	0.6	0.96	1.2	0.45
E6.16	0.8	0.2	1.6	2	0.05
E6.17	0.8	0.4	1.6	2	0.2
E6.18	0.8	0.6	1.6	2	0.45
RE5.13	0.8	0.2	0.96	1.2	0.05
RE5.14	0.8	0.4	0.96	1.2	0.2
RE5.15	0.8	0.6	0.96	1.2	0.45
RE6.16	0.8	0.2	1.6	2	0.05
RE6.17	0.8	0.4	1.6	2	0.2
RE6.18	0.8	0.6	1.6	2	0.45

FONTE: O autor (2021)

Para medição da rugosidade das peças foi utilizado um rugosímetro da marca Mitutoyo, modelo SJ-201 (FIGURA 10). Quando se mede a rugosidade com um rugosímetro, o instrumento apresenta o perfil da peça composto de rugosidade e ondulações, através de filtragem adequada é possível fazer a separação da rugosidade e desvios de forma. O comprimento de onda do filtro é chamado de cut-off (λ_c), sinais de alta frequência representam a rugosidade e os de baixa frequência, as ondulações. Os valores de cut-off são determinados pela norma ISO 4287. Para esses ensaios foi utilizado $\lambda_c = 2,5\text{mm}$.

FIGURA 10 – MONTAGEM DA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE



FONTE: O autor (2021)

Os corpos de prova foram fixados em placa e o rugosímetro sobre desempenho e calços para atingir a altura necessária para atingir a superfície da peça.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o experimento foi medida a força de corte de cada ensaio através do uso do dinamômetro piezoelétrico. Todos os gráficos de força de corte, imagens dos cavacos resultantes de cada usinagem e fotos das amostras posteriormente ao experimento, tanto dos testes como de suas repetições, constam no APÊNDICE 1 deste trabalho. Posteriormente ao experimento foi medida a rugosidade de cada amostra, e os resultados constam na TABELA 2.

TABELA 2 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Experimento	Classificação Cavaco		Fc máxima [N]		Fc média [N]		Ra [μm]	
	E	RE	E	RE	E	RE	E	RE
1.1	1-3	1-3	2.93	1.76	1.37	0.67	0.82	0.78
1.2	1-3	1-3	3.12	3.71	1.51	1.84	2.41	2.56
1.3	1-3	1-3	3.52	3.32	2.36	2.19	5.36	5.29
2.4	1-3	1-3	3.12	3.32	1.67	1.75	0.79	1.12
2.5	1-3	1-3	5.47	4.49	2.71	2.81	2.53	2.49
2.6	1-3	1-3	8.59	5.47	3.92	3.79	5.63	5.71
3.7	1-3	1-3	5.47	6.44	3.79	3.68	1.53	1.56
3.8	2-3	2-3	6.64	7.81	5.64	5.79	3.90	3.99
3.9	1-3	1-3	10.35	8.98	8.22	7.95	8.72	8.74
4.10	1-3	1-3	7.81	6.84	5.77	5.29	1.77	1.33
4.11	2-3	2-3	11.92	9.96	9.71	9.03	4.64	4.30
4.12	4-3	4-3	13.87	13.67	13.00	12.78	9.66	9.50
5.13	2-3	2-3	11.72	11.52	10.56	10.37	1.68	1.69
5.14	4-3	4-3	19.53	19.14	18.38	18.36	7.76	6.96
5.15	4-3	4-3	28.71	27.74	26.64	26.79	16.27	16.89
6.16	4-3	4-3	18.56	18.75	17.52	17.34	1.81	1.77
6.17	4-3	4-3	32.23	31.64	30.68	30.58	8.21	7.84
6.18	4-3	4-3	46.68	45.51	44.89	44.28	19.31	19.70

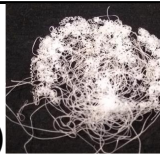
FONTE: O autor (2021)

4.1 AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO CAVACO GERADO

Após realização dos experimentos, o cavaco gerado foi coletado, fotografado e classificado de acordo com a ABNT NBR ISO 3685:2017, essa classificação pode ser verificada na TABELA 1. As fotografias geradas foram dispostas em duas figuras diferentes. A primeira (FIGURA 11), apresenta o cavaco gerado para os experimentos

em que foi utilizada uma relação de $a_p = 1,2R_e$ e, a segunda (FIGURA 12), os experimentos em que foi utilizado $a_p = 2R_e$. As imagens em alta resolução estão dispostas no APÊNDICE 1.

FIGURA 11 - CAVACOS OBTIDOS COM $A_p = 1,2R_e$

	Relação f/Re					
Re (mm)	0.25		0.5		0.75	
0.2	a)		b)		c)	
0.4	d)		e)		f)	
0.8	g)		h)		i)	

FONTE: O autor (2021)

FIGURA 12 - CAVACOS OBTIDOS COM $A_p = 2R_e$

	Relação f/Re		
Re (mm)	0.25	0.5	0.75
0.2	a) 	b) 	c) 
0.4	d) 	e) 	f) 
0.8	g) 	h) 	i) 

FONTE: O autor (2021)

Pode-se notar com a avaliação das figuras acima que para menores profundidades de corte e menores avanços existe a tendência de formação do cavaco em forma de fita emaranhada, tendendo para um cavaco tubular emaranhado, quando se aplicam dados de cortes de valores intermediários, e evolui para um cavaco helicoidal emaranhado com a utilização de parâmetros mais agressivos. Verificou-se também que o cavaco de formato helicoidal foi que possui maior tendência de desprendimento da peça ainda durante o processo de usinagem

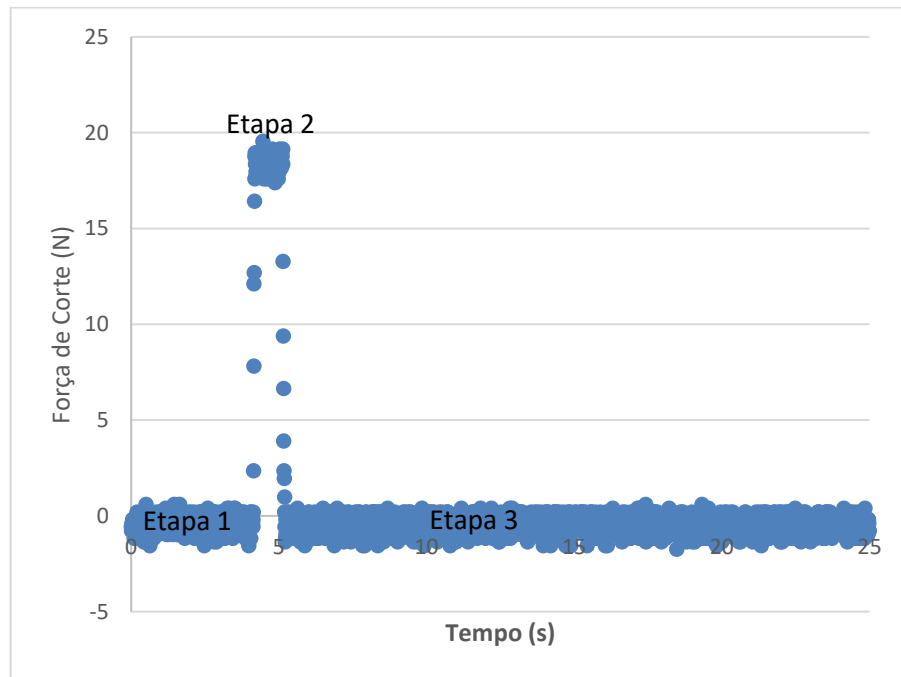
4.2 AVALIAÇÃO DA FORÇA DE CORTE

Os dados de força de corte coletados através do uso do dinamômetro piezoelétrico foram tratados em planilha eletrônica para obtenção da força média de corte durante o processo de usinagem de cada amostra. O GRÁFICO 1 apresenta um exemplo de gráfico gerado com os dados coletados pelo dinamômetro. Os demais são apresentados APÊNDICE 1.

Para facilitar o seu entendimento e do experimento, o GRÁFICO 1 será dividido em três etapas, as quais serão descritas abaixo:

- Etapa 1: compreendida pelo avanço da ferramenta em direção à peça, antes do início da usinagem;
- Etapa 2: compreendida pelo momento em que a peça está sendo usinada, ou seja, a força de corte atingirá valores elevados;
- Etapa 3: compreendida pelo momento em que a ferramenta de corte deixa de ter contato com a peça até o fim da aquisição de dados pelo dinamômetro, o que levou 25 segundos nesse experimento.

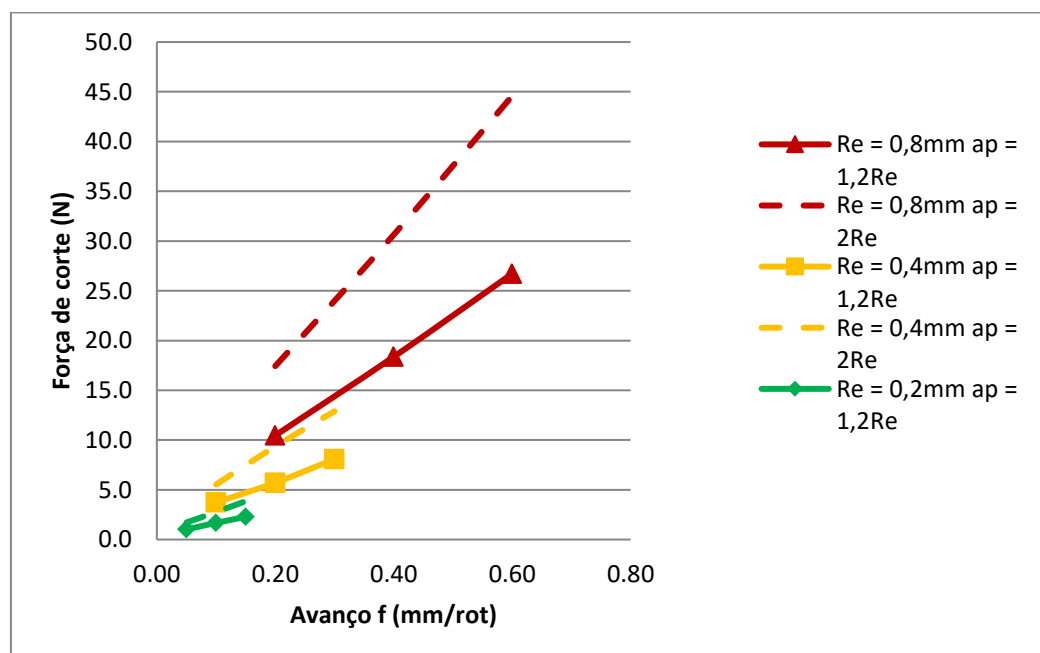
GRÁFICO 1 - FORÇA DE CORTE MEDIDA PELO DINAMÔMETRO



FONTE: O autor (2021)

Foram calculadas as médias dos valores de força de corte na Etapa 2 para todos os gráficos gerados. Com isso, foi possível confeccionar um gráfico de “Força de corte versus avanço”, conforme GRÁFICO 2.

GRÁFICO 2 - FORÇA DE CORTE NO TORNEAMENTO DO UHMWPE

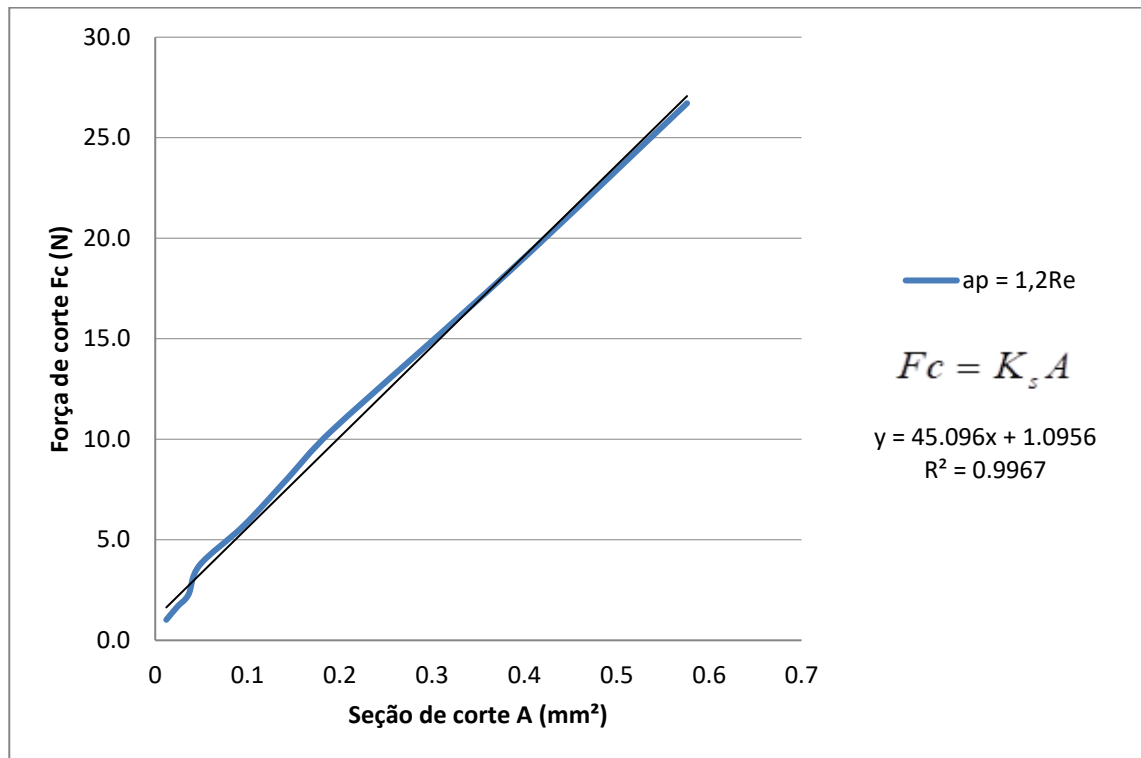


FONTE: O autor (2021)

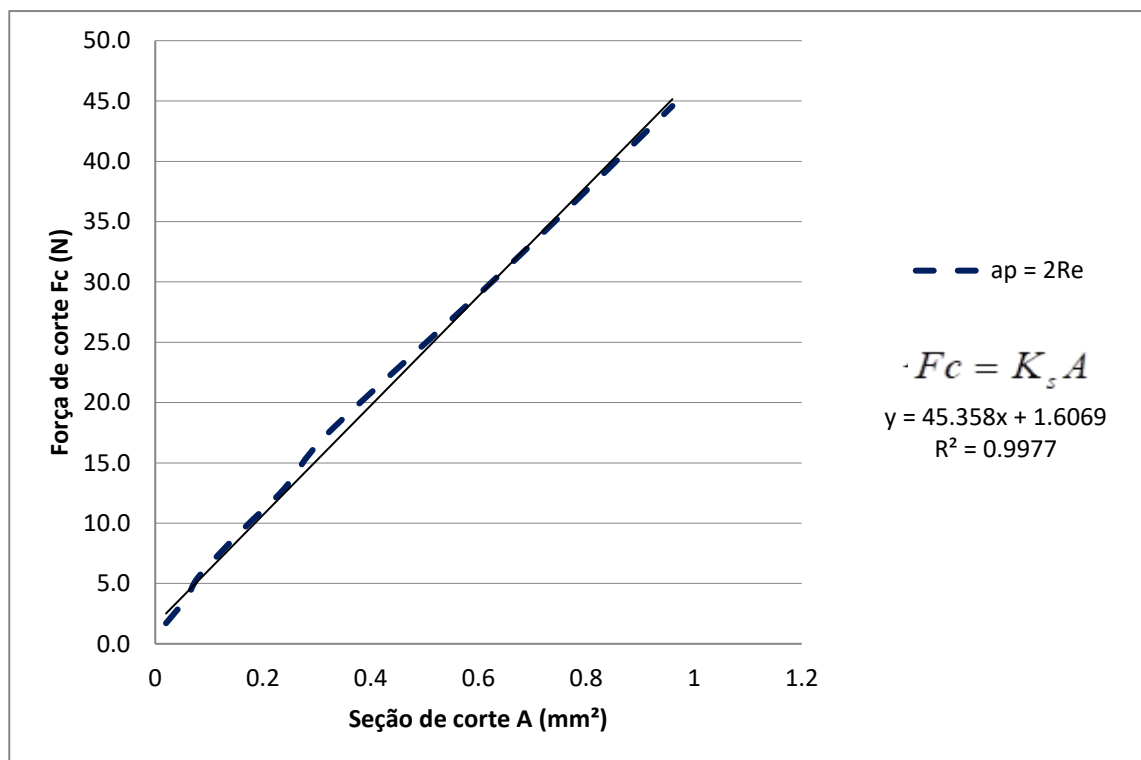
Ao avaliar o gráfico, nota-se que ocorre o aumento da força de corte conforme aumentam-se os valores de avanço, profundidade de corte e raio de ponta da ferramenta. Esse comportamento era esperado conforme estudado na bibliografia de Rebeyka (2016) e Stemmer (1993).

4.2.1 Determinação da pressão específica de corte do UHMWPE

Com os dados de força obtidos no experimento e com o auxílio da Equação 1, foi possível traçar as curvas de “força de corte *versus* área da seção de corte” para os casos em que $a_p = 1,2R_e$ e $a_p = 2R_e$. Para determinação da pressão específica de corte basta encontrar a equação linear que descreve cada uma das curvas e encontrar o seu coeficiente angular. Este será o valor da sua pressão específica de corte para determinada espessura de corte. O GRÁFICO 3, apresenta a curva obtida para o caso em que $a_p = 1,2R_e$ e o GRÁFICO 4, para quando $a_p = 2R_e$. As regressões lineares que descrevem os pontos obtidos, bem como seus respectivos R^2 , são apresentadas juntamente nos gráficos.

GRÁFICO 3 - FORÇA DE CORTE PARA $A_P = 1,2R_E$ 

FONTE: O autor (2021)

GRÁFICO 4 - FORÇA DE CORTE PARA $A_P = 2R_E$ 

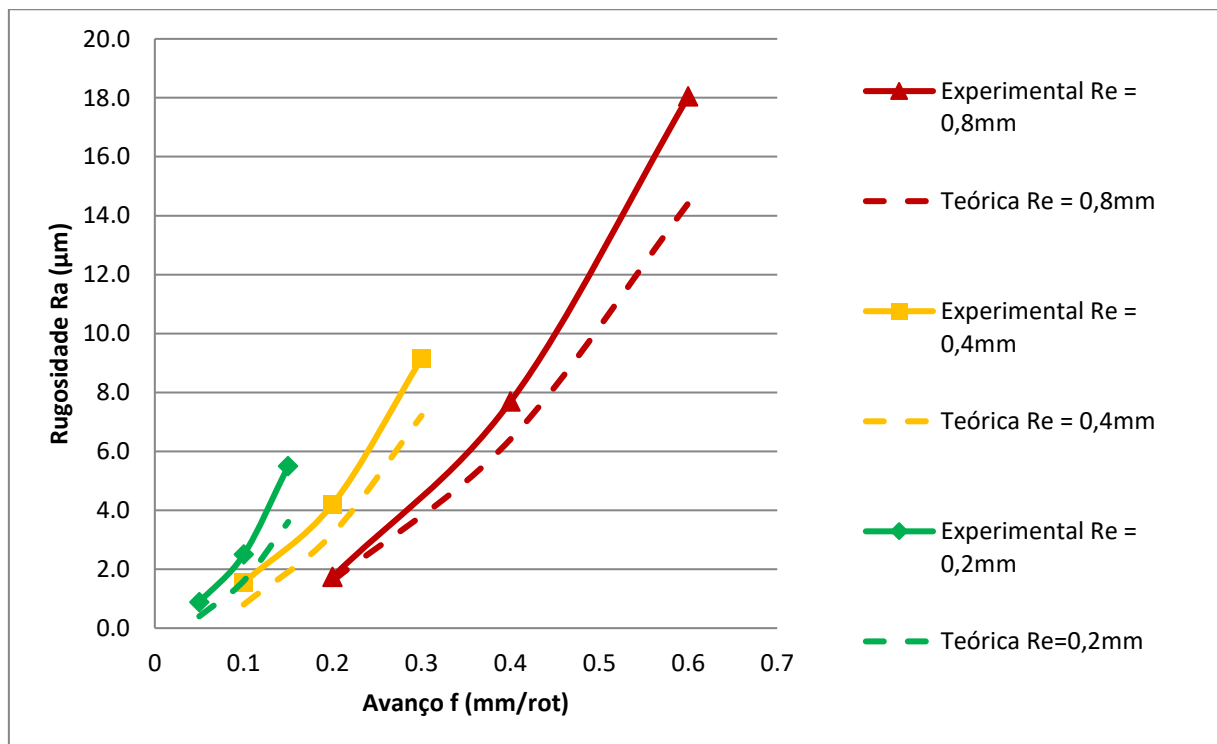
FONTE: O autor (2021)

Com isso, pode-se estabelecer que o valor de K_s para o UHMWPE, nas condições avaliadas nesse estudo foi, em média, de $45,2\text{N/mm}^2$. À título de comparação, segundo (BRASKEM, 2018), fabricante de UHMWPE, sua tensão de ruptura sob tração é superior aos 30N/mm^2 . Portanto, o valor experimental de K_s encontrado para o UHMWPE pode ser utilizado como valor de referência para outros estudos subsequentes.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE RUGOSIDADE MÉDIA TEÓRICA E RUGOSIDADE MÉDIA EXPERIMENTAL

Com o uso do rugosímetro foi realizada a medição da rugosidade em cada superfície usinada em três repetições, posteriormente foi calculada a média das rugosidades para cada experimento. Com isso, pôde-se confeccionar “Rugosidade média *versus* avanço”, conforme mostrado no GRÁFICO 5. Nele, é possível verificar a comparação com o modelo teórico para cálculo da rugosidade média, modelado pela EQUAÇÃO 2.

GRÁFICO 5 - RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO DO UHMWPE



FONTE: O autor (2021)

Como era de se esperar os valores de rugosidade média experimentais superaram os valores teóricos, pois esses não levam em consideração fatores como vibrações, desgaste da ferramenta de corte, fixação instável da peça e/ou ferramenta, dentre outros.

Para avaliação da discrepância entre valores teóricos e experimentais, o erro relativo foi calculado ponto a ponto, conforme TABELA 3.

TABELA 3 - ERRO RELATIVO ENTRE RUGOSIDADE MÉDIA TEÓRICA E EXPERIMENTAL

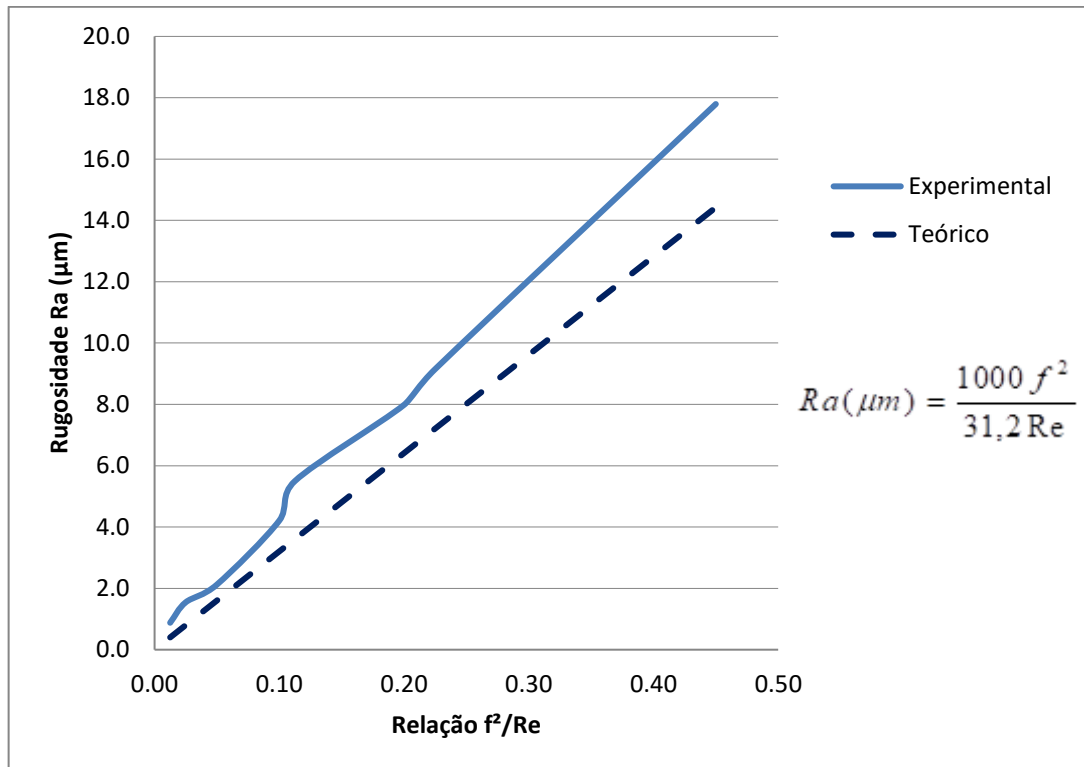
Experimento	Ra [μm]		
	E	RE	Teórico
1.1	0.82	0.78	0.40
1.2	2.41	2.56	1.60
1.3	5.36	5.29	3.61
2.4	0.79	1.12	0.40
2.5	2.53	2.49	1.60
2.6	5.63	5.71	3.61
3.7	1.53	1.56	0.80
3.8	3.90	3.99	3.21
3.9	8.72	8.74	7.21
4.10	1.77	1.33	0.80
4.11	4.64	4.30	3.21
4.12	9.66	9.50	7.21
5.13	1.68	1.69	1.60
5.14	7.76	6.96	6.41
5.15	16.27	16.89	14.42
6.16	1.81	1.77	1.60
6.17	8.21	7.84	6.41
6.18	19.31	19.70	14.42

FONTE: O autor (2021)

Pode-se verificar que o erro relativo médio foi de 28% e o erro máximo foi de 64%. Ou seja, o modelo matemático para cálculo da rugosidade média fornece uma boa estimativa do valor real.

Outra comparação realizada entre o modelo teórico e os dados experimentais deu-se da seguinte forma: foi estabelecida a relação f^2/R_e para todos os experimentos realizados e, para os casos em que essa relação era igual, foi realizada a média dos valores de rugosidade obtidos, e posteriormente comparados com os valores calculados através da Equação 2 para a mesma relação f^2/R_e . Dessa maneira, foi obtido o GRÁFICO 6.

GRÁFICO 6 - COMPARATIVO ENTRE RUGOSIDADE MÉDIA TEÓRICA E EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2021)

A curva pontilhada representa os valores teóricos de rugosidade e, a curva contínua, os valores experimentais. A curva teórica apresenta comportamento linear e a experimental possui comportamento semelhante, porém apresenta algumas irregularidades, em decorrência do erro experimental.

Em teoria, independente dos valores de f e Re , quando se tem a mesma relação f^2/Re a rugosidade superficial deve ser a mesma, o que não ocorre na prática.

5 CONCLUSÕES

Pôde-se notar, através da realização dos experimentos e medições realizadas, que a usinagem do UHMWPE com o uso destes insertos estudados apresenta estabilidade. Os resultados de todos experimentos, bem como de suas repetições apresentaram valores semelhantes em todos os fatores estudados (formas de cavaco, força de corte e rugosidade).

Pela avaliação e classificação do cavaco gerado, pode-se afirmar que, conforme aumentam-se os parâmetros de corte estudados (profundidade de corte, avanço e raio de ponta) existe a tendência de o cavaco deixar de ser do formato de fita e passar a ser do formato helicoidal. Outro ponto importante verificado é de que quanto mais agressivos os parâmetros de corte citados, maior a tendência de desprendimento do cavaco da peça, quando comparado à parâmetros de corte mais suaves, embora para esses casos ocorra um aumento da rugosidade da peça usinada.

Através da análise gráfica, pode-se concluir que quando se tem um aumento do avanço, profundidade de corte e raio de ponta da ferramenta, a força de corte também aumenta.

A determinação da pressão específica de corte para o UHMWPE é interessante pois se trata de um parâmetro essencial para estimativa de força de corte, mas que, para esse material em específico, é uma informação muito difícil de se encontrar na literatura convencional da área de usinagem, pois esta está focada, em sua maioria, em processos de usinagem de materiais metálicos como aço, ferro fundido e alumínio.

O modelo matemático para cálculo da rugosidade média apresentado por Whitehouse mostrou bons resultados para a usinagem do UHMWPE com os insertos em questão. O erro relativo médio foi de 28% para esse experimento. Logo, a EQUAÇÃO 2 se torna interessante para realização de uma estimativa da rugosidade do UHMWPE, com isso fica mais fácil de se planejar um processo de usinagem para esse material em que haja necessidade de um acabamento superficial controlado. Dessa forma, existe uma menor perda de tempo e recursos para se atingir o processo correto.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo dos seguintes tópicos para dar continuidade a esse trabalho:

- Avaliar os mesmos insertos na usinagem de outros materiais poliméricos (polietilenos, polipropileno, náilon, etc.) ou até mesmo ligas de alumínio, visto que o fabricante das pastilhas recomenda o seu uso para ligas de alumínio e materiais não-ferrosos;
- Testar outra geometria de inserto para a usinagem do UHMWPE com os mesmos parâmetros de corte utilizados neste trabalho. Dessa forma é possível ter um comparativo entre geometrias;
- Avaliar o processo de fresamento do UHMWPE para comparação dos resultados obtidos experimentalmente com modelos teóricos propostos para fresamento. Por exemplo a rugosidade média, assim como realizado nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, H. J. Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramentas de metal duro. Dissertação de Mestrado—Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.
- BRASKEM. Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE). [s.l.: s.n.]. Disponível em:
<<https://www.braskem.com.br/cms/Principal/Catalogo/Download?CodigoCatalogo=22>>.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Introdução. 9. ed. [s.l.: s.n.].
- CARR, J. W.; FEGER, C. Ultraprecision machining of polymers. Precision Engineering, v. 15, n. 4, p. 221–237, 1 out. 1993.
- COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. DE. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 13, n. 1, p. 1–13, 2003.
- DIAS DA COSTA, D. et al. UHMWPE molecular structure analysis after turning operations and machinability with a standard off-the-shelf carbide too. 2019.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. E.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.
- FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 1970.
- FETECAU, C. et al. Machining and surface integrity of polymeric materials. Machining and surface integrity of polymeric materials, 2008.
- GILLIBRAND, D.; SARWAR, M.; PIERCE, C. T. The economic benefit of finish turning with coated carbide. 1996.
- GROOVER, M. P. Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- JAGTAP, T. U.; MANDAVE, H. A. Machining of Plastics: A Review. p. 577–581, 2015.
- KOBAYASHI, A.; HIRAKAWA, K. Ultraprecision Machining of Plastics, part 1, polymethyl methacrylate. p. 15–25, 1984.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. Introdução a polímeros. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 1999.
- MICHAELI, W. Tecnologia dos plasticos: livro texto e de exercicios. [s.l.] Editora Blucher, 1995.
- NUNES, H. Parâmetros de avaliação da rugosidade - Acabamento Superficial, 2021.

PARIDA, A. K.; MAITY, K. Effect of nose radius on forces, and process parameters in hot machining of Inconel 718 using finite element analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 20, n. 2, p. 687–693, 1 abr. 2017.

REBEYKA, C. J. *Princípios dos processos de fabricação por usinagem*. 1. ed. [s.l.] Intersaberes, 2016. v. 1

RODRIGUES, A. R.; JASINEVICIUS, R. G. *Estado de Superfície* São Paulo, 2012.

SALLES, J. L. C.; CORRÊA, L. O.; GONÇALVES, M. T. T. *Estudo da Usinabilidade do Polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE)*. 2003.

STARES, S. L. *Usinagem de parafusos implantáveis de P(L/DL)LA autorreforçados*. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

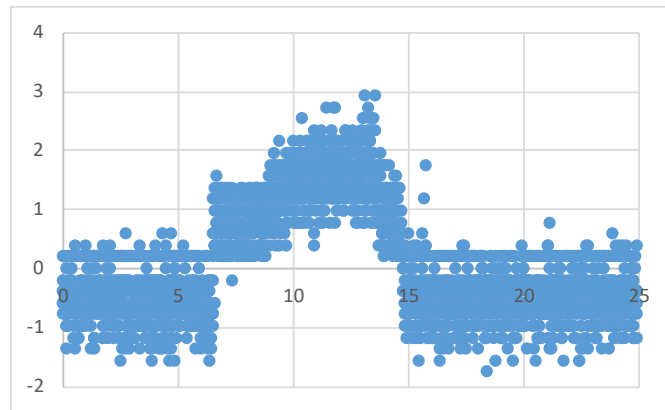
STEMMER, C. E. *Ferramentas de Corte I*. 4. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1993. v. 1

WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of Surface Metrology*. Bristol: [s.n.].

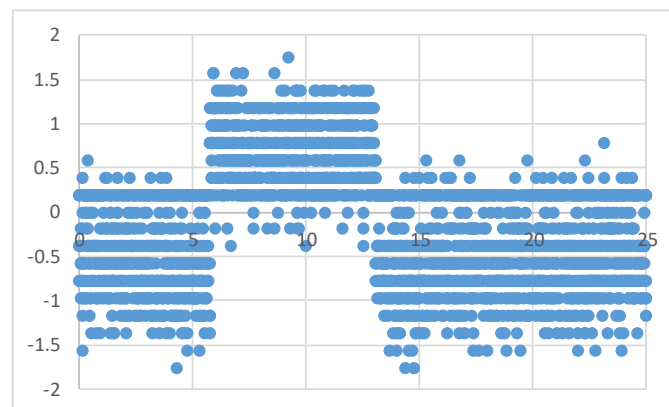
APÊNDICE 1 – GRÁFICOS FORÇA DE CORTE X TEMPO, IMAGENS DOS EXPERIMENTOS E CAVACOS GERADOS

$f = 0,05 \text{ mm/rev}$; $r_e = 0,2\text{mm}$; $a_p = 0,24\text{mm}$

E1.1 :

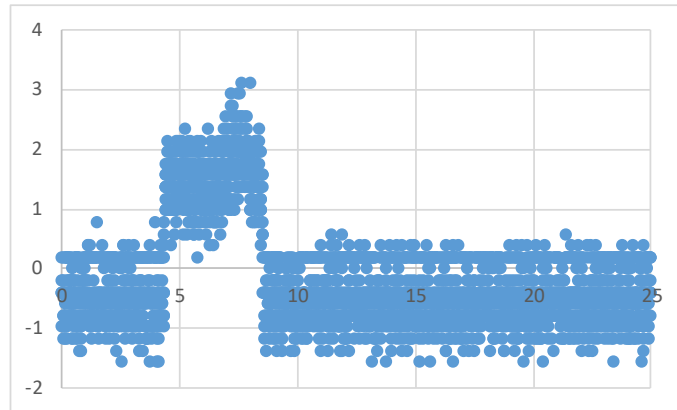


RE1.1 :

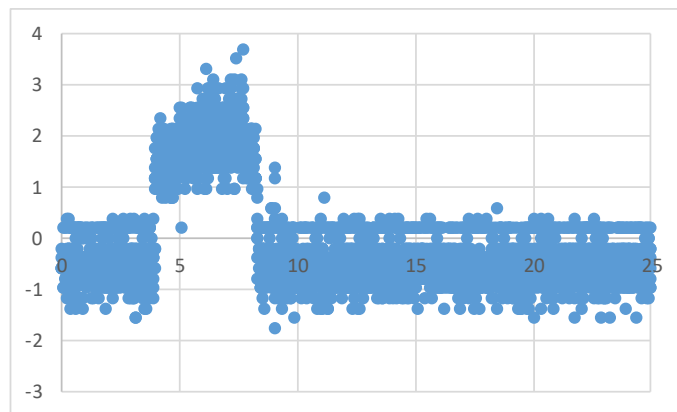


$f = 0,1\text{mm/rev}$; $r_\epsilon = 0,2\text{ mm}$; $a_p = 0,24\text{ mm}$

E1.2 :

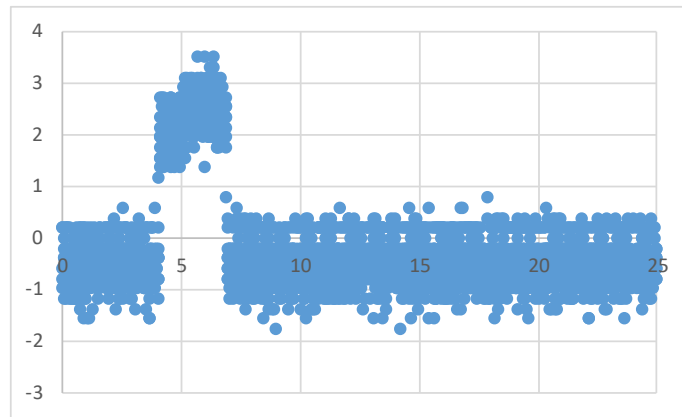


RE1.2 :

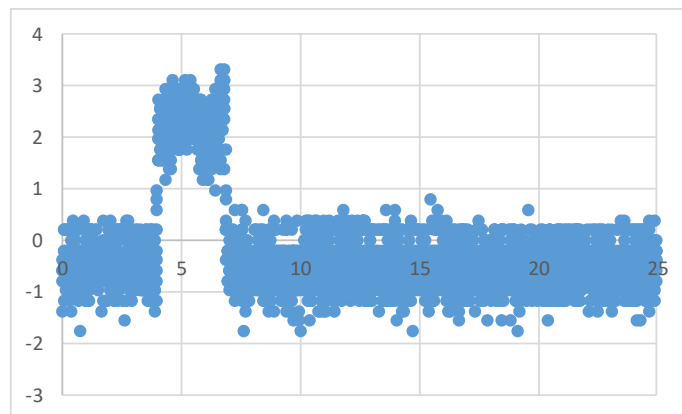


$$f = 0,15 \text{ mm/rev}; r_{\epsilon} = 0,2\text{mm}; a_p = 0,24\text{mm}$$

E1.3 :

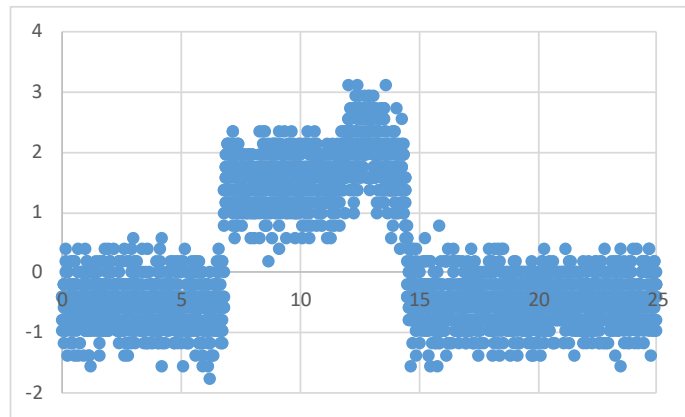


RE1.3 :

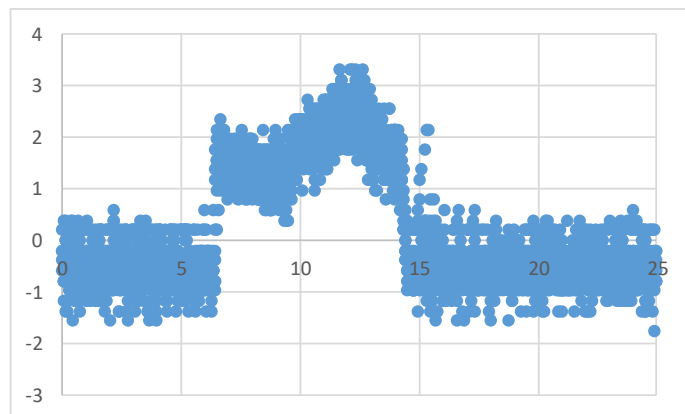


$$f = 0,05\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,2\text{mm}; a_p = 0,4\text{mm}$$

E2.4 :

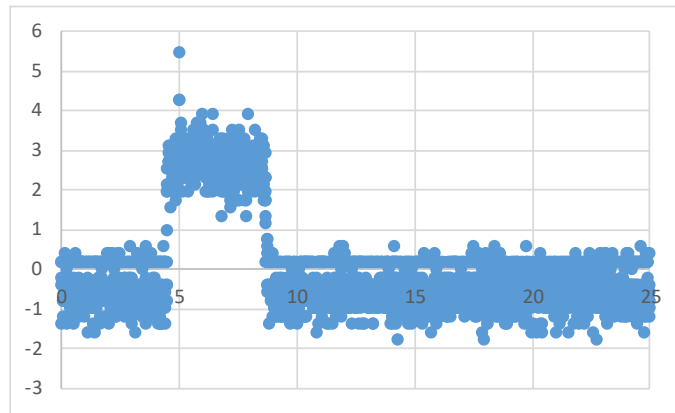


RE2.4 :

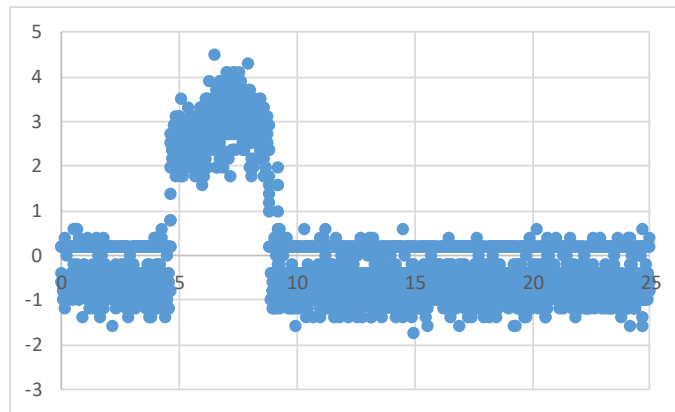


$$f = 0,1\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,2\text{mm}; a_p = 0,4\text{mm}$$

E2.5:

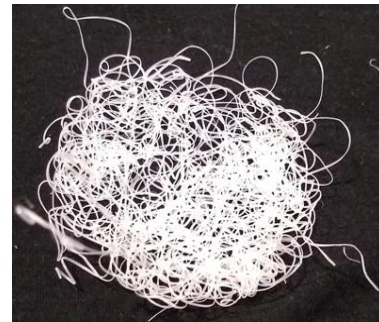
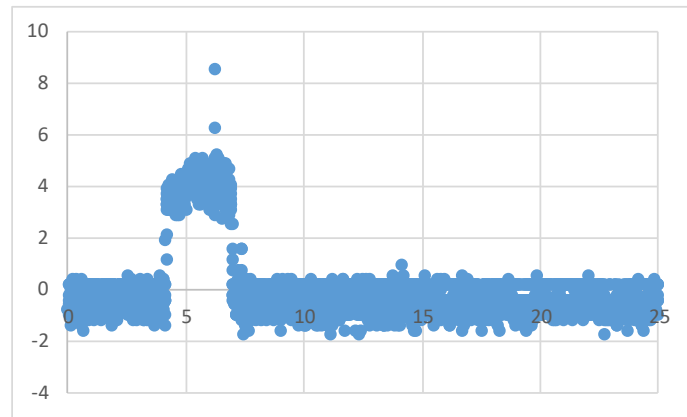


RE2.5:

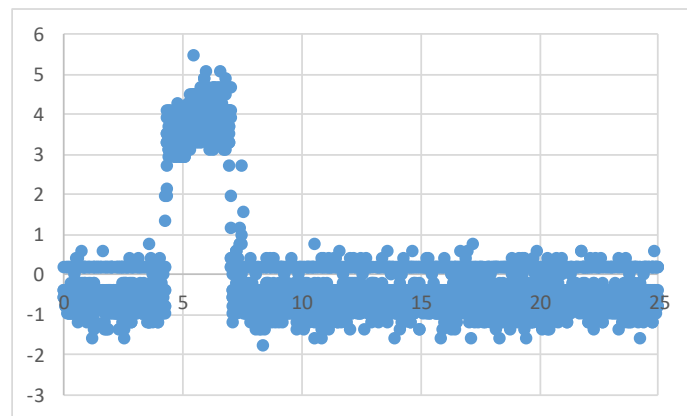


$$f = 0,15\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,2\text{mm}; a_p = 0,4\text{mm}$$

E2.6:

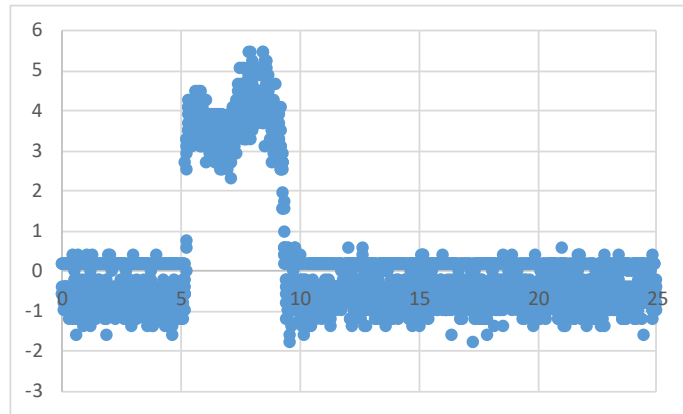


RE2.6:

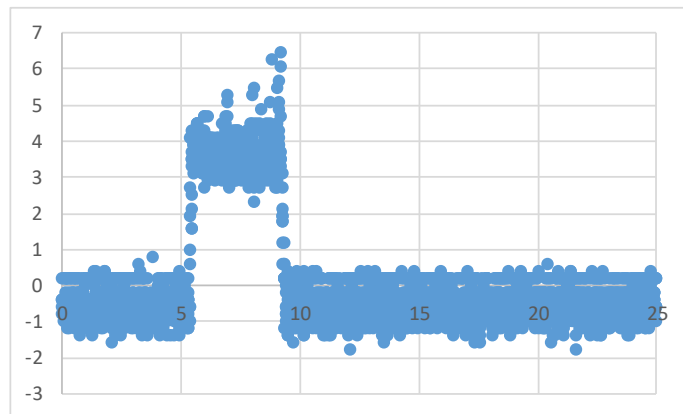


$$f = 0,1\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,4\text{mm}; a_p = 0,48\text{mm}$$

E3.7:

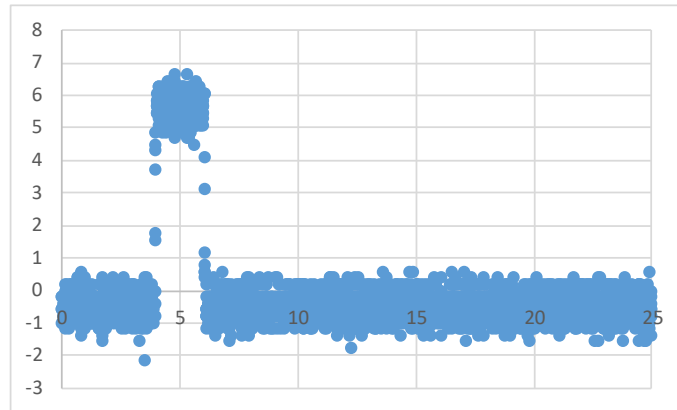


RE3.7:

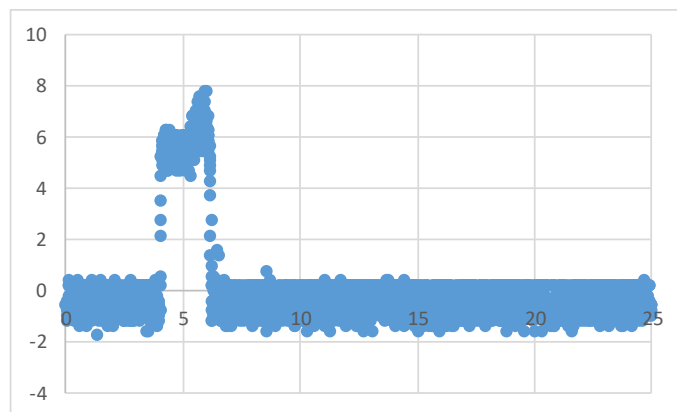


$$f = 0,2\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,4\text{mm}; a_p = 0,48\text{mm}$$

E3.8:

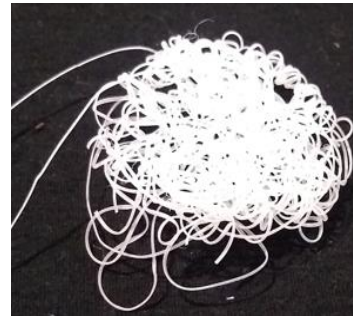
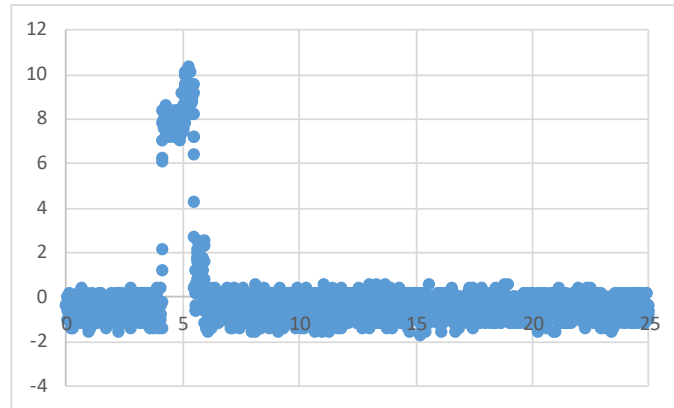


RE3.8:

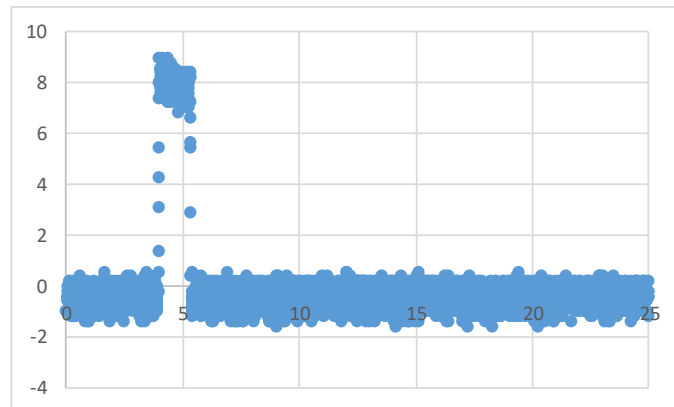


$$f = 0,3\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,4\text{mm}; a_p = 0,48\text{mm}$$

E3.9:

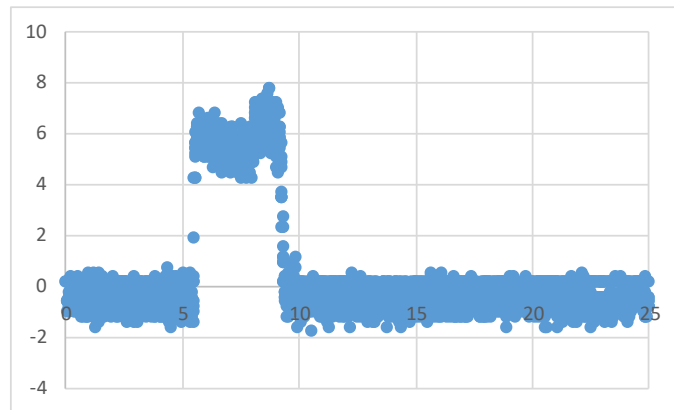


RE3.9:

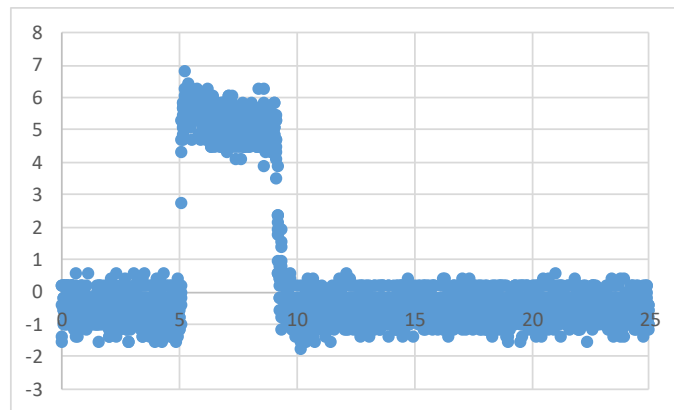


$$f = 0,1\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,4\text{mm}; a_p = 0,8\text{mm}$$

E4.10:

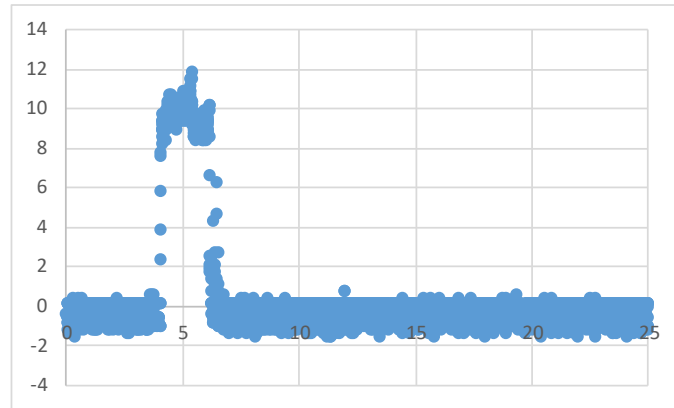


RE4.10:

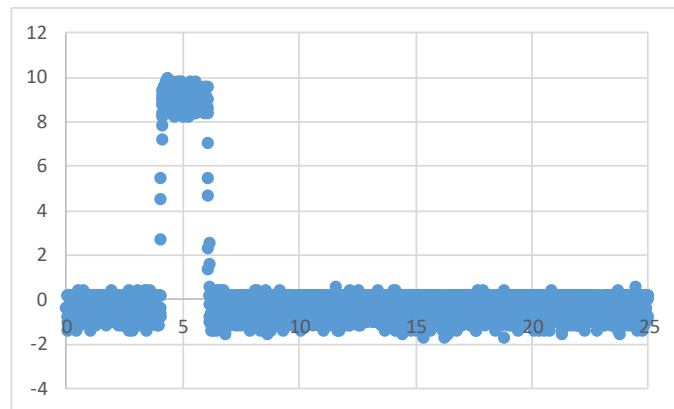


$$f = 0,2\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,4\text{mm}; a_p = 0,8\text{mm}$$

E4.11:

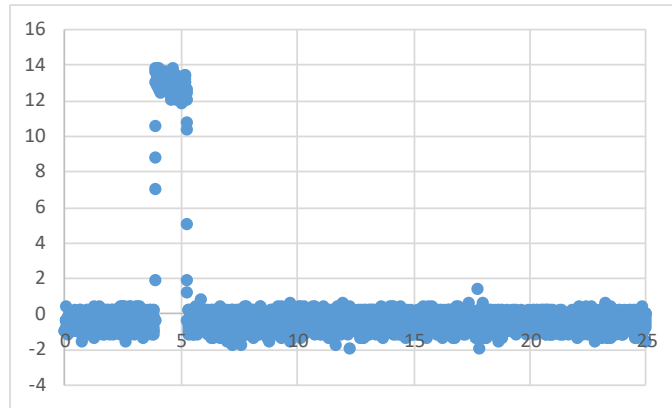


RE4.11:

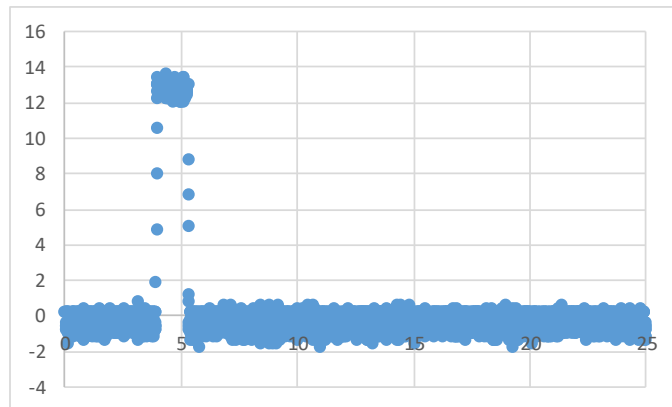


$$f = 0,3\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,4\text{mm}; a_p = 0,8\text{mm}$$

E4.12:

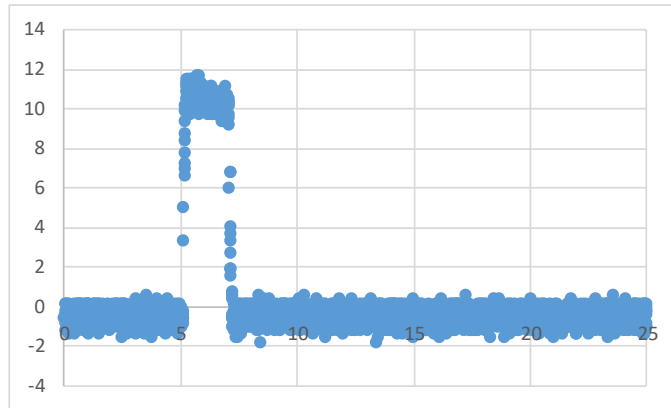


RE4.12:

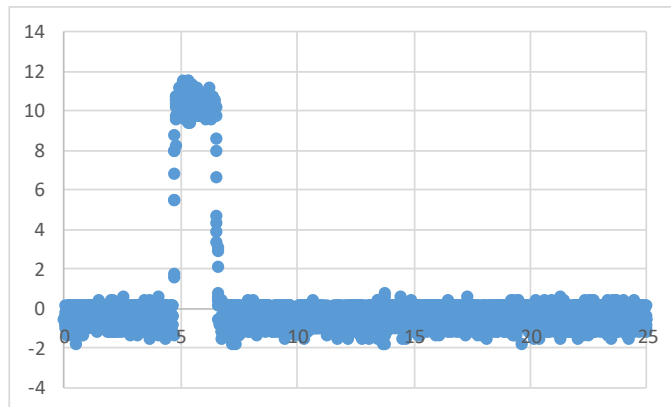


$$f = 0,2\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,8\text{mm}; a_p = 0,96\text{mm}$$

E5.13:

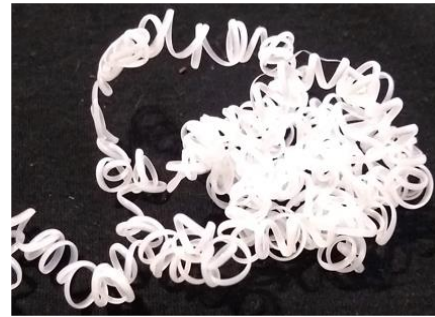
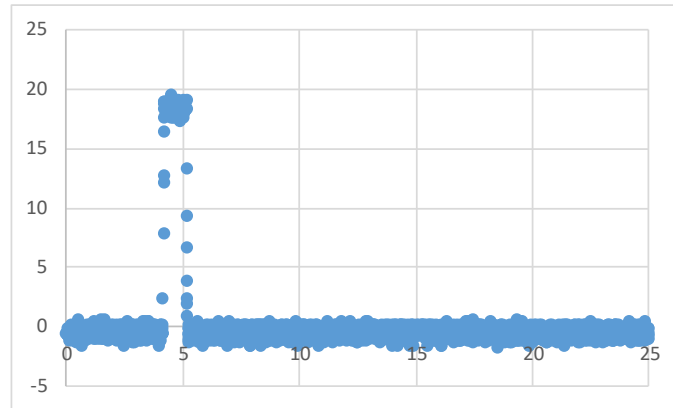


RE5.13:

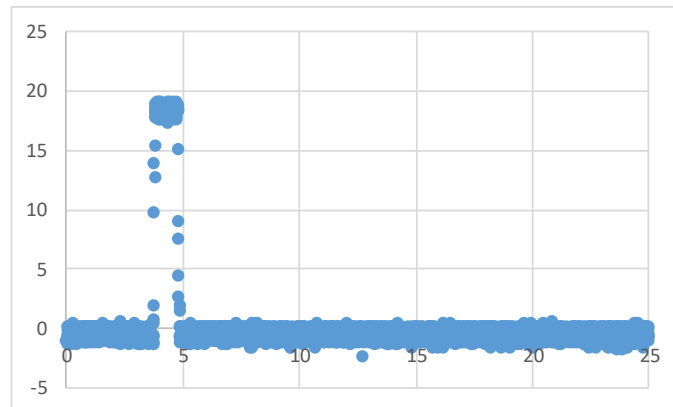


$$f = 0,4\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,8\text{mm}; a_p = 0,96\text{mm}$$

E5.14:

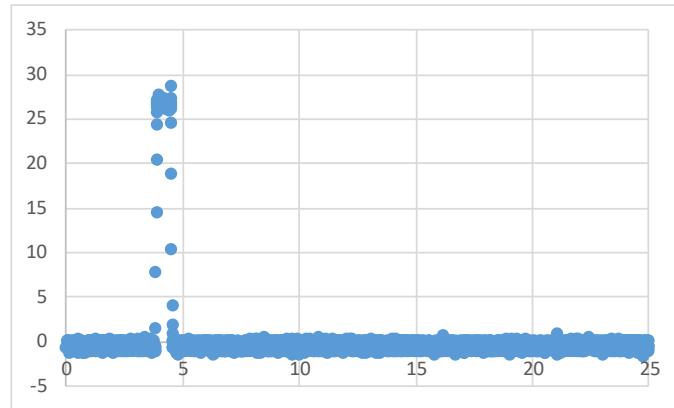


RE5.14:

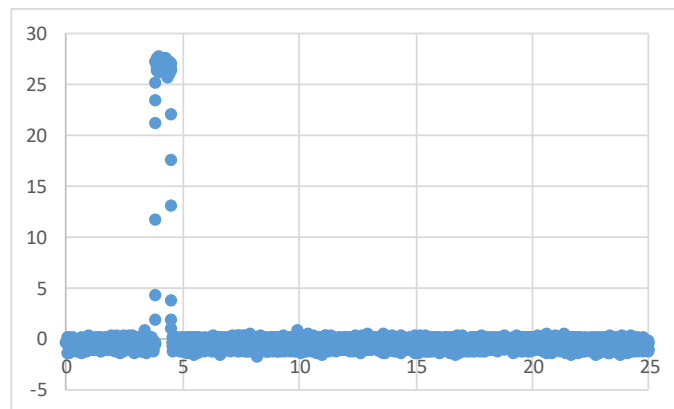


$f = 0,6\text{mm/rev}$; $r_\epsilon = 0,8\text{mm}$; $a_p = 0,96\text{mm}$

E5.15:

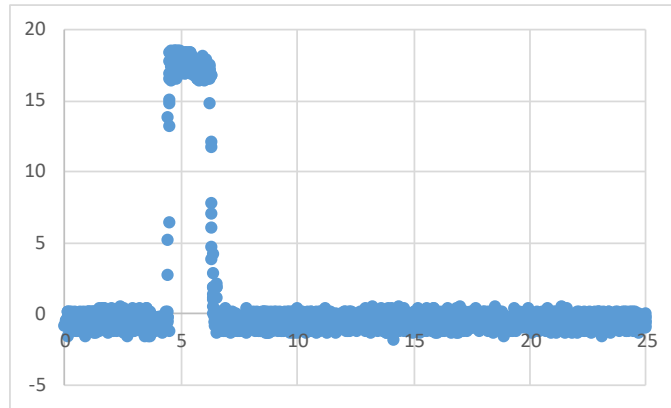


RE5.15:

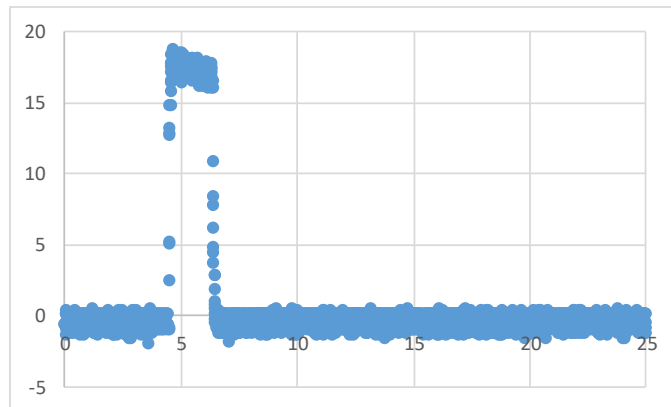


$f = 0,2\text{mm/rev}$; $r_\epsilon = 0,8\text{mm}$; $a_p = 1,6\text{mm}$

E6.16:

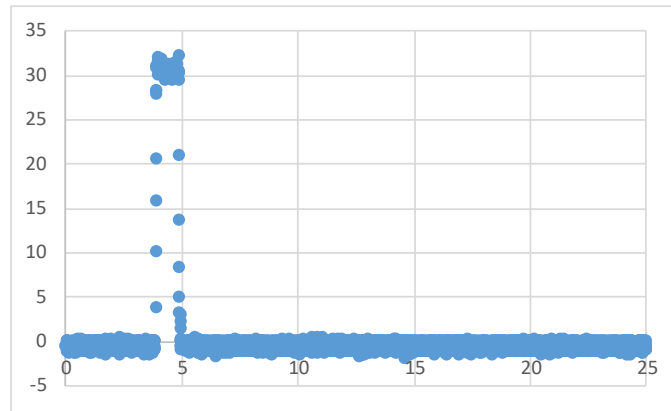


RE6.16:

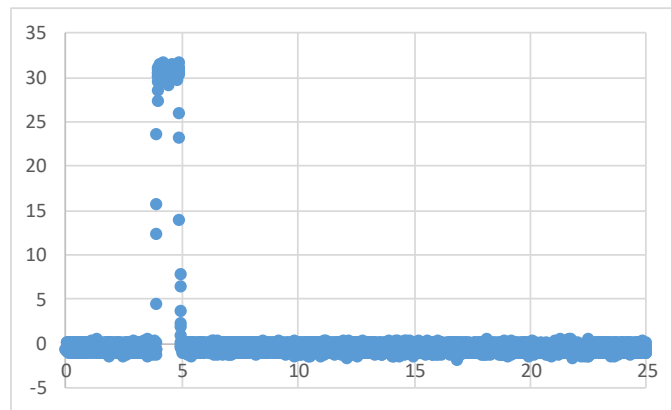


$$f = 0,4\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,8\text{mm}; a_p = 1,6\text{mm}$$

E6.17:

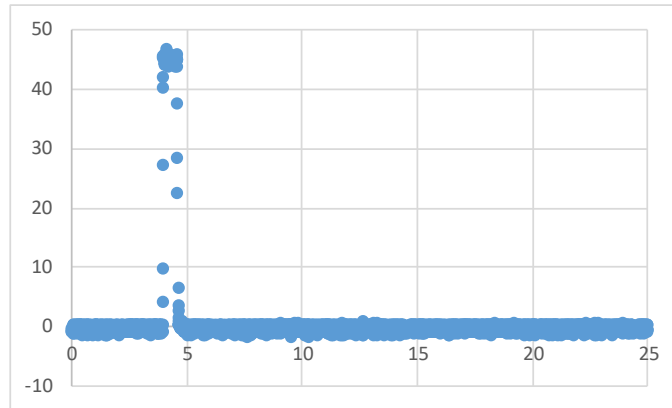


RE6.17:

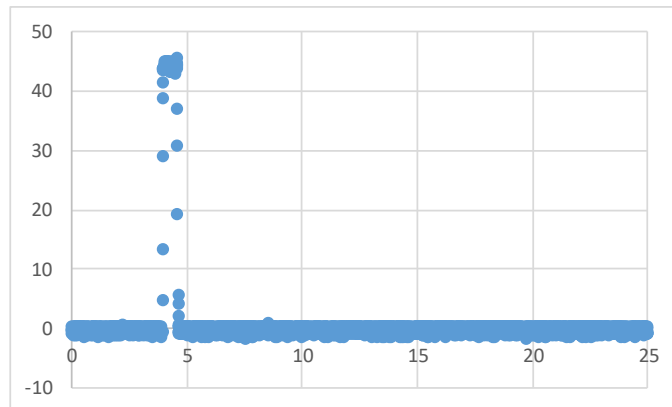


$$f = 0,6\text{mm/rev}; r_\epsilon = 0,8\text{mm}; a_p = 1,6\text{mm}$$

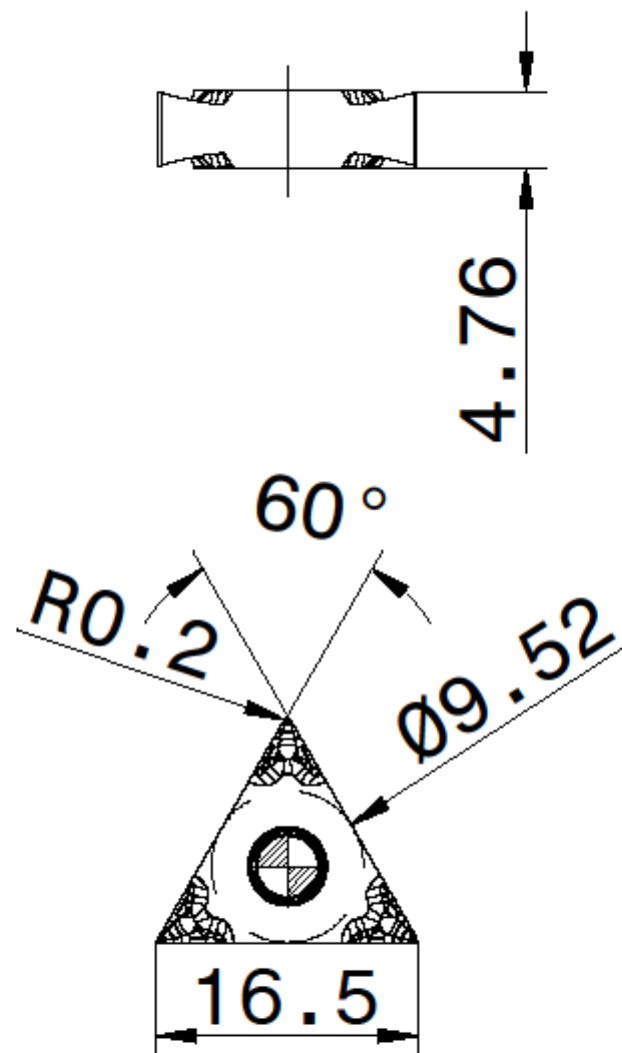
E6.18:



RE6.18:

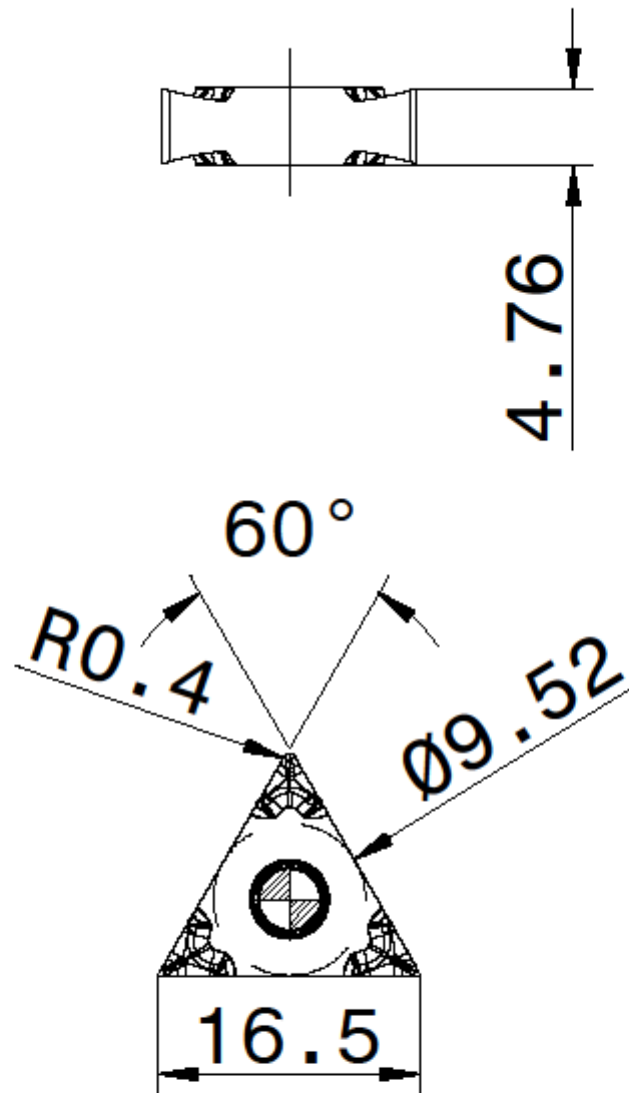


ANEXO 1 – INSERTO TNGG 160402-M3N-P



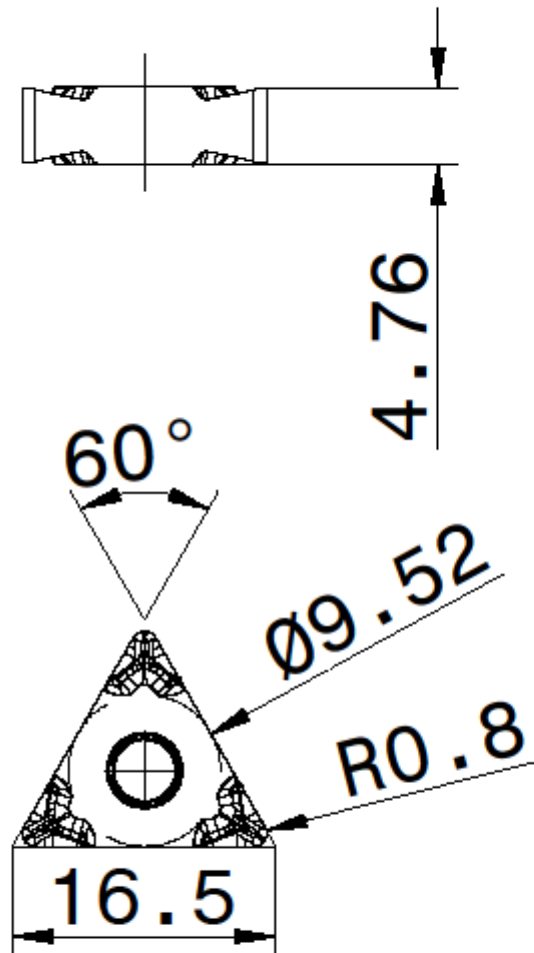
TNGG 160402-M3N-P

ANEXO 2 – INSERTO TNGG 160404-M3N-P



TNGG 160404-M3N-P

ANEXO 3 – INSERTO TNGG 160408-M3N-P



TNGG 160408-M3N-P