



**Universidade de  
Aveiro  
Ano 2014**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Pedro Miguel da  
Silva Cunha**

**Análise de alguns aspetos de microtorneamento de  
polímeros**





**Pedro Miguel da  
Silva Cunha**

**Análise de alguns aspetos de microtorneamento de  
polímeros**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



Dedico este trabalho aos meus pais, Joaquim Cunha e Idalina Silva, pelo incansável apoio e acompanhamento ao longo deste percurso.



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Morais**  
professor associado da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor António Paulo Monteiro Baptista**  
professor associado com agregação da Universidade do Porto

**Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva**  
professor associado com agregação da Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva com quem tive o prazer e o privilégio de trabalhar, pela disponibilidade e orientação durante esta dissertação.

Ao Engenheiro Carlos Lauro, pelos ensinamentos, disponibilidade e ajuda no laboratório de tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica.

Ao Engenheiro António Festas, pelos ensinamentos, esclarecimentos e ajuda prestada nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica.

A todos os professores do departamento de engenharia mecânica da Universidade de Aveiro, pelos conhecimentos transmitidos durante o meu percurso académico.

À minha família e amigos, pela motivação e incentivo para chegar ao fim deste percurso da minha vida.

E a todos os demais que de uma forma direta e indireta me ajudaram a finalizar não só este trabalho, como todo o percurso académico.



**palavras-chave**

Maquinagem, microtorneamento, polímeros, ferramentas e parâmetros de corte.

**resumo**

No presente trabalho realizou-se um estudo sobre a micro maquinagem de polímeros – nomeadamente PET, POM-C, PVC, HMWPE e UHMWPE – num torno CNC convencional, recorrendo a ferramentas de corte de carbonetos sinterizados.

Numa primeira fase foi avaliado o comportamento dos polímeros perante a maquinagem, verificando o acabamento superficial, a temperatura na ferramenta de corte e o efeito da velocidade de corte.

Na segunda fase foram verificados os melhores parâmetros para a obtenção de uma peça na microescala, bem como a influência do comprimento em balanço.

A última fase do trabalho consistiu na produção de peças com diâmetros reduzidos, tendo por objetivo verificar a capacidade da sua produção em tornos CNC convencionais.

Verificou-se que os materiais mais macios são tendencialmente difíceis de maquinar, não permitindo a obtenção de diâmetros reduzidos. Dentro dos materiais testados, o PVC evidenciou uma maior propensão para a miniaturização, tendo obtido tanto um bom acabamento superficial como um baixo defeito de forma.



**keywords**

Machining, micro-turning, polymers, cutting tools and cutting parameters.

**abstract**

The present thesis contemplates a study on the micro machining of polymers - including PET, POM-C, PVC and UHMWPE HMWPE – in a conventional CNC lathe, using sintered carbides cutting tools.

The first stage concerns the assessment of the behavior of polymers before machining, through the verification of surface finish, the temperature in the cutting tools and the effect of shear rate.

In the second stage a verification activity was led in order to establish the best parameters to obtain a part in the micro escale, as well as the influence of the cantilever length.

The last stage of this work consisted in the production of parts with small diameters, aiming to verify the capacity of its production in conventional CNC lathes.

The study conducted led to the conclusion that softer materials tend to be difficult to machine, not allowing the obtainment of reduced diameter. Among the tested materials, PVC showed a greater propensity for miniaturization, having obtained both a good surface finish and a low defect of form.





# ÍNDICE

---

ÍNDICE .....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
ÍNDICE DE TABELAS.....	V
ACRÓNIMOS E SIGLAS .....	VII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações gerais .....	1
1.2 Objetivo deste estudo .....	2
1.3 Organização da presente dissertação .....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Ferramentas de corte.....	6
2.3 Forças de corte .....	7
2.4 Temperatura de corte.....	8
2.5 Acabamento da superfície.....	10
2.6 Síntese.....	11
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	15
3.1 Materiais ensaiados .....	15
3.1.1 Politereftalato de Etileno (PET) .....	15
3.1.2 Polioximetileno (POM-C) .....	16
3.1.3 Policloreto de vinil (PVC).....	16
3.1.4 Polietileno de elevado peso molecular (HMWPE).....	17
3.1.5 Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMWPE) .....	18
3.2 Propriedades principais dos materiais ensaiados.....	19
3.3 Torno CNC.....	19
3.4 Ferramenta de corte utilizada.....	20
3.5 Provetes para o torneamento.....	21
3.6 Estratégia de corte .....	22
3.7 Parâmetros de maquinagem .....	22
3.7.1 Velocidade de corte.....	23
3.7.2 Avanço .....	23
3.7.3 Profundidade de corte .....	23
3.7.4 Índice de esbelteza .....	24
3.8 Medição da temperatura .....	24



3.9 Métodos de caracterização da superfície.....	25
3.9.1 Rugosímetro .....	25
3.9.2 Microscópio ótico .....	26
3.10 Síntese .....	28
4 RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO.....	31
4.1 Avaliação dos parâmetros .....	32
4.1.2 Politereftalato de Etileno (PET).....	35
4.1.3 Polioximetileno (POM-C).....	38
4.1.4 Policloreto de vinil (PVC) .....	41
4.2 Miniaturização .....	44
4.2.2 Estratégia de maquinagem .....	46
4.2.3 Peças maquinadas .....	46
4.2.4 Formas mais complexas .....	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
5.1 Conclusões gerais .....	51
5.2 Trabalhos futuros.....	52
6 REFERÊNCIAS.....	53
ANEXOS .....	57
Anexo A: Tabelas de rugosidades .....	59
Anexo B: Aspeto dos provetes torneados.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

FIGURA 1.1 - PEÇA MODELO EFETUADA .....	2
FIGURA 2.1 - DIFERENTES ZONAS DE DEFORMAÇÃO (GUBBELS, 2006).....	9
FIGURA 3.1 - TORNO CNC KINGBURY MHP 50 .....	20
FIGURA 3.2 - PASTILHAS USADAS NO TORNEAMENTO (TPGN 16 03 04 H13A) (SANDVIK COROMANT, 2014A).....	20
FIGURA 3.3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PORTA-FERRAMENTAS CTGPL 2020K 16 (SANDVIK COROMANT, 2014B).....	21
FIGURA 3.4 - EXEMPLO DE PROVETES UTILIZADOS NOS ENSAIOS.....	21
FIGURA 3.5 - REPRESENTAÇÃO DO PROVETE MAQUINADO.....	22
FIGURA 3.6 - RUGOSÍMETRO HOMMEL TESTER T1000 E.....	25
FIGURA 3.7 - PONTOS DE MEDIÇÃO.....	26
FIGURA 3.8 - LOCAL DE MEDIÇÃO PARA O DIÂMETRO MÉDIO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DO DIÂMETRO E DO ÂNGULO.....	27
FIGURA 3.9 - AQUISIÇÃO DOS ÂNGULOS PARA COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DO ÂNGULO .....	27
FIGURA 3.10 - MICROSCÓPIO ÓTICO MITUTOYO TM E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGEM E ILUMINAÇÃO UTILIZADOS.....	28
FIGURA 3.11 - ESQUEMA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	29
FIGURA 4.1 - PROVETES COM ELEVADA RUGOSIDADE E DEFEITO DE FORMA ....	33
FIGURA 4.2 - MATERIAL NÃO CORTADO .....	34
FIGURA 4.3 - APARA ENROLADA NO PROVETE .....	34
FIGURA 4.4 - RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA DO PET EM FUNÇÃO DO AVANÇO E DA PROFUNDIDADE DE CORTE.....	36
FIGURA 4.5 - AMPLITUDE MÁXIMA DA RUGOSIDADE DO PET EM FUNÇÃO DO AVANÇO E DA PROFUNDIDADE DE CORTE.....	36
FIGURA 4.6 - PROVETE DE PET .....	37
FIGURA 4.7 - RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA DO POM- EM FUNÇÃO DO AVANÇO E DA PROFUNDIDADE DE CORTE.....	39
FIGURA 4.8 - AMPLITUDE MÁXIMA DA RUGOSIDADE DO POM-C EM FUNÇÃO DO AVANÇO E DA PROFUNDIDADE DE CORTE.....	39
FIGURA 4.9 - PROVETES DE POM-C .....	40
FIGURA 4.10 - RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA DO PVC EM FUNÇÃO DO AVANÇO E DA PROFUNDIDADE DE CORTE.....	42

FIGURA 4.11 - AMPLITUDE MÁXIMA DA RUGOSIDADE DO PVC EM FUNÇÃO DO AVANÇO E DA PROFUNDIDADE DE CORTE .....	42
FIGURA 4.12 - PROVETE DE PVC.....	43
FIGURA 4.13 - EXEMPLO DE UM PROVETE COM ELEVADO DEFEITO DE FORMA OBTIDO NA MINIATURIZAÇÃO .....	45
FIGURA 4.14 - ESTRATÉGIAS DE MAQUINAGEM .....	46
FIGURA 4.15 - COMPARAÇÃO DAS PEÇAS MAQUINADAS COM UM PORTA-MINAS DE 0.5 MM E ENTRE SI. ....	47
FIGURA 4.16 - COTAS DA MICROPEÇA MODELO COM UMA FORMA MAIS COMPLEXA .....	48
FIGURA 4.17 - ESTRATÉGIA DE MAQUINAGEM.....	48
FIGURA 4.18 - FOTOGRAFIA DAS PEÇAS COM UMA FORMA MAIS COMPLEXA.....	50
FIGURA 4.19 - PEÇAS COM FORMA MAIS COMPLEXA COMPARADAS A UMA RÉGUA. ....	50

## ÍNDICE DE TABELAS

---

TABELA 2.1 - PARÂMETROS DE CORTE E RESPECTIVOS RESULTADOS, EM TERMOS DE RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE.....	12
TABELA 2.2 - PARÂMETROS DE CORTE, QUADRANT .....	12
TABELA 2.3 - PROBLEMAS E POSSÍVEIS CAUSAS DOS MESMOS .....	13
TABELA 3.1 - PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ENSAIADOS.....	19
TABELA 3.2 - AVANÇOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS .....	23
TABELA 3.3 - PROFUNDIDADES DE CORTE UTILIZADAS NOS ENSAIOS .....	24
TABELA 4.1 - MELHORES RESULTADOS OBTIDOS NA RUGOSIDADE DE CADA MATERIAL ENSAIDO E ALGUMAS DAS SUAS PROPRIEDADES (ADAPTADO DE LANEMA (2014)) .....	31
TABELA 4.2 - EFEITO DA REDUÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE NO VALOR DA RUGOSIDADE (RA) .....	32
TABELA 4.3 - VALORES DAS RUGOSIDADES MEDIDAS NO PET ( $V_c = 16$ M/MIN) ....	35
TABELA 4.4 - FATORES DE AVALIAÇÃO DA FORMA OBTIDA NOS PROVETES DE PET ( $V_c = 16$ M/MIN).....	37
TABELA 4.5 - VALORES DAS RUGOSIDADES MEDIDAS NO POM-C ( $V_c = 16$ M/MIN) .....	38
TABELA 4.6 - FATORES DE AVALIAÇÃO DA FORMA OBTIDA NOS PROVETES DE POM-C ( $V_c = 16$ M/MIN).....	40
TABELA 4.7 - VALORES DAS RUGOSIDADES MEDIDAS NO PVC ( $V_c = 16$ M/MIN)....	41
TABELA 4.8 - FATORES DE AVALIAÇÃO DA FORMA OBTIDA NOS PROVETES DE PVC ( $V_c = 16$ M/MIN).....	43
TABELA 4.9 - VALORES DA AVALIAÇÃO GLOBAL .....	44
TABELA 4.10 - MEDIDAS REAIS OBTIDAS NOS PROVETES DE MINIATURIZAÇÃO .....	46
TABELA 4.11 - MEDIDAS DA PEÇA MODELO .....	49
TABELA A.1 - VALORES DAS RUGOSIDADES MEDIDAS NO PET .....	59
TABELA A.2 - VALORES DAS RUGOSIDADES MEDIDAS NO POM-C .....	59
TABELA A.3 - VALORES DAS RUGOSIDADES MEDIDAS NO PVC .....	60
TABELA A.4 - VALORES DAS RUGOSIDADES MEDIDAS NO HMWPE.....	60
TABELA A.5 - VALORES DAS RUGOSIDADES MEDIDAS NO UHMWPE .....	61
TABELA B.1 - FOTOGRAFIAS DOS PROVETES DE PET PARA UM COMPRIMENTO EM BALANÇO DE 20 MM.....	63
TABELA B.2 - FOTOGRAFIAS DOS PROVETES DE PET PARA UM COMPRIMENTO EM BALANÇO DE 30 MM.....	64

TABELA B.3 - FOTOGRAFIAS DOS PROVETES DE PVC PARA UM COMPRIMENTO EM BALANÇO DE 20MM .....	65
TABELA B.4 - FOTOGRAFIAS DOS PROVETES DE PVC PARA UM COMPRIMENTO EM BALANÇO DE 30 MM .....	66
TABELA B.5 - FOTOGRAFIAS DOS PROVETES DE POM-C PARA UM COMPRIMENTO EM BALANÇO DE 20 MM .....	67
TABELA B.6 - FOTOGRAFIAS DOS PROVETES DE POM-C PARA UM COMPRIMENTO EM BALANÇO DE 30 MM .....	68

## ACRÓNIMOS E SIGLAS

---

$a$	Avanço de corte
$b$	Comprimento em balanço
CNC	Comando numérico computarizado
CVDD	<i>Diamond chemical vapour deposition</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
Et al.	e outros (do Latim <i>et alii</i> )
FANUC	<i>Fujitsu Automated Numerical Control</i>
HMWPE	Polietileno de ultra elevado peso molecular
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	Tolerância internacional
K20	Ferramenta de carbonetos sinterizado
m/min	Metro por minuto
mm	Milímetro
mm/rot	Milímetro por rotação
MQL	<i>Minimal Quantities of Lubrication</i>
$p$	Profundidade de corte
PCD	<i>Polycrystalline diamond</i>
PET	Politereftalato de Etileno
PMMA	Polimetil-metacrilato
POM-C	Polioximetileno
PVC	Policlreto de vinil
Ra	Rugosidade média aritmética
Rt	Rugosidade máxima
Rta	Rugosidade média aritmética teórica
Rtt	Rugosidade máxima teórica
Rpm	Rotações por minuto
UHMWPE	Polietileno de elevado peso molecular
$v_c$	Velocidade de corte
$\gamma$	Ângulo de ataque da ferramenta
$\alpha$	Ângulo de folga
$r_\epsilon$	Raio de curvatura da ponta
$\lambda$	Ângulo de inclinação

$k_r$	Ângulo de posição da ferramenta
%	Porcentagem
$\mu\text{m}$	Micrómetro
$\mu\text{m/rot}$	Micrómetro por rotação

# 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 Considerações gerais

O leque de aplicações possíveis para materiais poliméricos tem vindo a crescer nos últimos anos, provocando um aumento da importância da maquinagem de polímeros. Devido às características dos polímeros, estes têm vindo a substituir os mais variados materiais tais como o metal, o vidro e a madeira. Este facto justifica-se pelo seu baixo peso, pela sua capacidade de resistir em meios corrosivos e pela flexibilidade de produção.

Os materiais poliméricos são produzidos através de vários processos de fabrico, de entre os quais se destaca a extrusão, a injeção e a termoformagem. Devido ao elevado custo das ferramentas para moldes ou extrusão, estes processos são viáveis apenas para a produção de grandes series, como componentes para a indústria automóvel – tais como painéis e coberturas. Para a produção de uma pequena serie, o que por vezes é necessário para obter componentes personalizados, formas complexas ou formas com grande toleranciamento é necessário maquinar (Alauddin *et al.*, 1995), (Maciel, Lauro and Brandão, 2010).

A micromaquinagem é definida de forma diferente por diversos autores. Porém todos concordam que este é um processo onde as dimensões da ferramenta, componente ou parâmetros de corte se encontram na faixa dos micrómetros (Oliveira, 2012).

A produção de microcomponentes requer métodos que permitam repetibilidade e fidelidade, com ferramentas de precisão (Chae, Park and Freiheit, 2006). Uma vez que as máquinas produzidas para o fabrico de micropeças são dispendiosas, tem-se vindo a efetuar estudos com o intuito de encontrar soluções que nos permitam produzir as mesmas com precisão dimensional e qualidade de superfície em tornos CNC convencionais, permitindo que estas sejam produzidas por um maior número de empresas e tornando o processo mais económico.

Os parâmetros de corte e a geometria da ferramenta devem ser analisadas de acordo com o material e o torno a utilizar. Isto, porque cada material necessita de parâmetros de maquinagem diferentes.



## 1.2 Objetivo deste estudo

Devido à falta de estudos nesta área - nomeadamente no que diz respeito à micromaquinagem de polímeros - e à ausência de tornos específicos para este fim na indústria portuguesa, é necessário encontrar alternativas mais acessíveis para a produção de peças com dimensões e qualidade de superfície apropriada para o fim requerido.

Assim, os objetivos a atingir no decurso do desenvolvimento do presente estudo (utilizando um torno CNC convencional) são os seguintes:

- Mostrar a combinação de avanço e profundidade de corte, onde se obtêm o melhor acabamento e precisão para cada um dos materiais em estudo;
- Averiguar os melhores materiais, dentro dos testados para a utilização na micromaquinagem, bem como a melhor estratégia de maquinagem;
- Determinar o diâmetro mínimo passível de ser maquinado;
- Verificar se é possível efetuar peças com geometrias complexas;
- Avaliar a capacidade de um torno CNC convencional, na maquinagem de micropeças em polímeros.

Na Figura 1.1 podemos observar a forma mais complexa, em micro escala, efetuada neste trabalho.

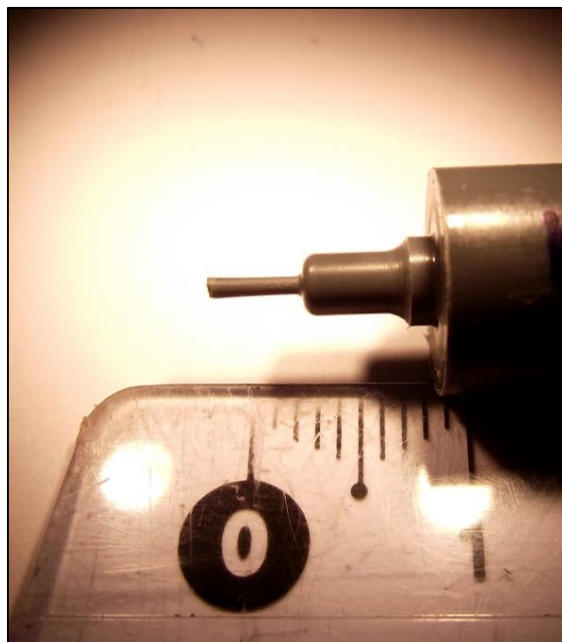


Figura 1.1 - Peça modelo efetuada

### 1.3 Organização da presente dissertação

A presente dissertação é composta por cinco capítulos, estando organizada da seguinte forma:

- No **Capítulo 1, “Introdução”**, é efetuada uma breve introdução ao trabalho efetuado.
- No **Capítulo 2, “Revisão bibliográfica”**, são descritos alguns estudos realizados por diversos investigadores na maquinaria de polímeros.
- No **Capítulo 3, “Metodologia experimental”**, são apresentados e caracterizados os materiais em estudo, as ferramentas de corte e equipamentos técnicos utilizados. É ainda apresentado o procedimento experimental, bem como as condições dos ensaios realizados.
- No **Capítulo 4, “Análise e discussão de resultados”**, é feita uma apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos.
- No **Capítulo 5, “Considerações Finais”**, são tecidas as conclusões gerais deste trabalho e feitas sugestões de possíveis trabalhos futuros.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 Introdução

Na maquinagem de polímeros, devemos ter mais sensibilidade na escolha dos parâmetros de corte do que na maquinagem de metais, de maneira a evitar a presença de fissuras e um mau acabamento superficial nas peças maquinadas.

Devido à baixa condutividade térmica dos polímeros, grande parte do calor é removido pela ferramenta, ao invés de ser removido pela peça como acontece com a maioria dos metais. Para além disso, aqueles apresentam uma baixa densidade, o que faz com que o calor específico por unidade de volume seja muito inferior ao dos metais. Consequentemente produz-se um aumento de temperatura, que poderá influenciar a qualidade da superfície maquinada e levar a um desgaste acentuado da ferramenta (Kobayashi, 1984).

O excesso de calor gerado pela operação de maquinagem pode provocar uma “queima” da superfície, exigindo um processo de acabamento. O calor é gerado através do trabalho de deformação, atrito entre a peça e a ferramenta e a peça e a ferramenta. Esta situação pode também ocorrer devido ao desgaste na aresta de corte da ferramenta, sendo que, na maioria das situações, este problema é causado devido às características reológicas e térmicas dos polímeros não serem consideradas – tais como a natureza viscoelástica dos polímeros, o coeficiente de expansão térmica, a condutividade térmica e o calor específico (Kobayashi, 1984).

A natureza viscoelástica dos polímeros traduz o seu comportamento mecânico quando sujeitos a deformação por aplicação de tensões. Este comportamento deve-se às propriedades dos polímeros apresentarem características elásticas, típicas dos metais, e características viscosas, típicas dos fluidos. As propriedades mecânicas de um polímero, de uma forma geral, são sensíveis à temperatura e ao tempo, o que não se verifica nos metais (O. Ebevele, 2000).

Ao contrário dos metais - onde a deformação e a fratura ocorrem nos planos de corte - nos polímeros a fratura pode ocorrer entre áreas amorfas e cristalinas. Como os polímeros são materiais dúcteis, a ação das forças de corte ou fixação pode originar deformação em virtude da fluência do polímero. A deformação provocada através da pressão exercida pela ferramenta pode resultar numa maior área de contacto entre a mesma e a ferramenta de

corte, levando a um aumento do atrito. Conseqüentemente, a escolha dos ângulos da ferramenta torna-se um fator importante (Kobayashi, 1984).

Kobayashi (1984) considera o valor do ângulo de ataque, um dos mais importantes fatores. Este influencia diretamente o tipo de deformação durante o processo de corte e o tipo de apra produzido. Quando se usa uma ferramenta com um ângulo negativo de ataque o material experimenta uma tensão de compressão. No entanto, quando utilizado um ângulo positivo, a tensão muda para tração. Na maioria dos casos, ângulos positivos produzem aparas contínuas e, à medida que o ângulo diminui, aumenta a tendência para produzir aparas descontínuas. Estas também podem ocorrer quando o material a maquinar é frágil ou com grande profundidade de corte.

## **2.2 Ferramentas de corte**

Salles & Gonçalves (1998) verificaram no processo de torneamento, a influência do tipo de ferramenta de corte no acabamento superficial do UHMWPE (Polietileno de Peso Molecular Ultra Alto). Para este estudo foram utilizados dois tipos de ferramentas de carbonetos diferentes (DCGX070204AL e DCMT070204 UM), fazendo variar a velocidade de corte (160, 280 e 400 m/min) e o avanço (0.05, 0.10, 0.15, 0.20 e 0.25 mm/rot). Das ferramentas de corte utilizadas verificou-se que a geometria DCGX070204AL é a mais indicada. A utilização da ferramenta de DCMT070204 UM demonstrou ser imprópria para a maquinagem de polímeros onde ocorria empastamento da apra e a adesão na superfície. A velocidade de corte não apresentou ser um fator influente nos valores da rugosidade obtida.

Davim et al. (2009) avaliaram a maquinabilidade da poliamida PA66, utilizando diferentes velocidades de avanço (10, 20, 40 e 80  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ) e quatro ferramentas de corte diferentes (PCD, CVDD, K15-KF, K15), mantendo a velocidade de corte a 70 m/min e a profundidade de corte a 150  $\mu\text{m}$ . Os provetes apresentavam as dimensões de 20 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento sendo que a o comprimento de corte foi restringido a 5 mm. No torneamento da poliamida PA66 quando utilizado um avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{rot}$  as maiores forças foram atingidas pela ferramenta K15-KF, seguido pela CVDD e PCD que apresentaram resultados similares, sendo que a ferramenta K15 apresentou os menores valores. Além disso, entre os diferentes ângulos de ataque das ferramentas, o ângulo positivo de 6° proporcionava uma redução das forças de torneamento. Quando testaram diferentes avanços, observaram que com o aumento deste a força específica de corte

tendia a diminuir - exceto para a ferramenta K15-KF. A nível da rugosidade superficial, concluíram que as ferramentas responsáveis por forças superiores apresentavam piores resultados. Todas as ferramentas obtiveram piores resultados com o aumento do avanço - exceto a ferramenta de PCD.

Vickerstaff e Gindy citados em Alauddin et al. (1995) estudaram a maquinagem de policarbonato, utilizando corte ortogonal e ferramentas para alta velocidade numa máquina de aplainar. Para o efeito, utilizaram os seguintes parâmetros: seis ângulos de ataque diferentes (-5, 0, 5, 10, 25 e 40 graus); velocidade de corte entre 9 e 36 m/min e as profundidades de corte de 0.13, 0.20, 0.30 e 0.38 mm. Neste estudo concluíram que as forças de corte diminuía com a passagem de um ângulo de ataque negativo para valores positivos.

### **2.3 Forças de corte**

Lapa et al. (2008) investigaram a maquinabilidade do PEEK e seus compósitos (PEEK/CF30) e (PEEK/GF30) em ambiente laboratorial e industrial. No estudo efetuado, nomeadamente no processo de torneamento, estes autores verificaram que com o aumento do avanço as forças e potência de corte e a rugosidade superficial aumentam. Por sua vez, à medida que velocidade de corte cresce verifica que estas diminuem. Os parâmetros de corte utilizados na operação de acabamento foram 150, 250 e 377 m/min para a velocidade de corte, 0.05, 0.10, 0.15 e 0.20 mm/rot para o avanço e uma profundidade de corte constante de 0.5 mm. As ferramentas de corte utilizadas para efetuar os ensaios foram diamante policristalino (PCD), carbonetos sinterizados (K20) e carbonetos sinterizados revestidos a diamante (CVD) – possuindo um ângulo de ataque e de inclinação de 0°, um ângulo de folga de 7° e um raio de ponta de 0.4mm. Destas ferramentas, a que proporcionou melhor acabamento superficial foi as de PCD, sendo que a ferramenta de CVD apresentou os piores resultados. Estes autores sugerem que o menor desempenho se deva ao menor acabamento da superfície de saída junto à aresta, bem como ao seu maior raio de aresta provocado pelo revestimento de diamante. Contudo, relativamente às forças de corte, uma vez que esta ferramenta possui quebra-apara, os valores são significativamente menores.

Fetecau et al. (2008) avaliaram o desenvolvimento das forças de corte e a distribuição da temperatura durante o corte ortogonal de três termoplásticos (CESTILENE HD 500 (HMWPE), ERTALYTE (PET) e ERTALON 6-SA (PA 66)) a diferentes velocidades de corte,

avanço e profundidade de corte. Para a realização deste estudo foi utilizada uma ferramenta de corte K20, com um ângulo de ataque positivo de 10° e as respectivas condições de corte: Velocidades de corte entre 24 e 140 m/min, profundidade de corte entre 0.5 e 2.0 mm e um avanço entre 0.024 e 0.300 mm/rot. Estes autores concluíram que a força de corte e a temperatura aumentavam com o aumento da velocidade e do avanço. O aumento da profundidade de corte acentuava esta relação. O CESTILENE (HMWPE) foi o material mais influenciado pelas condições de corte. A nível de rugosidade, concluíram que o aumento da velocidade de corte leva a um melhor acabamento superficial.

Keresztes et al. (2011) analisaram a maquinabilidade de diferentes polímeros de engenharia, nomeadamente o PA6, POM-C e o UHMWPE, sendo o torneamento o processo de corte escolhido para esta análise. Os parâmetros de corte utilizados para a avaliação foram as velocidades de corte de 50, 100 e 200 m/min, a profundidades de corte entre 0.1 e 2 mm e os avanços de 0.025, 0.05, 0.1 e 0.2 mm/rot. A ferramenta de corte apresentava um ângulo de ataque de 5° e um ângulo de folga de 10°. Concluíram que o PA 6G Mg era o material mais difícil de maquinar, quer do ponto de vista de força de corte como de resistência à força específica de corte. Devido a força específica de corte diminuir com o aumento dos parâmetros de corte (avanço e profundidade de corte), é recomendado o uso de um baixo avanço (0.025 mm/rot) e uma profundidade de corte entre 1 a 2 mm. O POM-C apresenta forças de corte inferiores e é recomendado o uso de velocidades de avanço e profundidade de corte superiores ao PA6G com o objetivo a favorecer o tipo de apara formada. O UHMWPE apresenta as menores forças de corte - onde é observado o menor valor da força específica de corte - sendo que a apara apresentada na maioria dos casos é do tipo espiral.

## **2.4 Temperatura de corte**

Smith (1989) avaliou o efeito da temperatura de transição vítrea (Tg) na qualidade da superfície de um termoplástico amorfo durante o processo de torneamento, chegando à conclusão que a Tg de um polímero é o fator mais importante na rugosidade da superfície. Se a temperatura na zona de corte for superior a Tg, é alcançada uma boa qualidade de superfície e o material é removido de uma forma dúctil. Caso contrário, o material experiencia um processo de rutura frágil, obtendo-se então uma superfície mais áspera.

Xiao & Zhang (2002) realizaram um estudo sobre a maquinabilidade de termoendurecidos (HCLE e LCLE) e termoplásticos (HDPE e LDPE) com baixa temperatura de transição

vítrea e baixa temperatura de fusão, com o objetivo de compreender o efeito das suas propriedades viscosas na integridade da superfície, formação da apra e forças de maquinagem. Verificaram que a deformação viscosa de um polímero desempenha um papel importante no acabamento superficial, uma vez que esta é dependente da relação entre a taxa de deformação e a temperatura. Quando a temperatura de corte se torna o fator dominante a deformação viscosa do polímero começa a sobressair passando a ter um papel mais importante na remoção do material. Para evitar este efeito pode recorrer-se à utilização de um fluido de refrigeração. Estes autores verificaram que termoplásticos com uma maior temperatura de transição vítrea e resistência mecânica apresentavam menor rugosidade, onde esta podia ser melhorada através do aumento da velocidade de corte. Por outro lado nos polímeros termoendurecidos é difícil obter uma superfície lisa, devido a estes serem incapazes de se deformarem plasticamente.

Gubbels (2006) investigou a precisão obtida no torneamento de polímeros vítreos (PMMA e PC). Mostrou que o aumento da velocidade de corte não leva a um aumento significativo da temperatura na zona principal de deformação, Figura 2.1. O aumento da velocidade de corte leva a que o calor seja transportado da zona principal de deformação para a apra. A ação combinada de condução de calor e transporte de material aumenta até 90%, levando o aquecimento adiabático a ser combatido pela grande quantidade de calor removido pela apra. O autor verificou que a utilização de um pequeno ângulo de ataque positivo ou negativo diminuía a rugosidade superficial e que a utilização de um grande ângulo negativo ( $-20^\circ$ ) provoca o aumento de temperatura na zona primária de deformação.

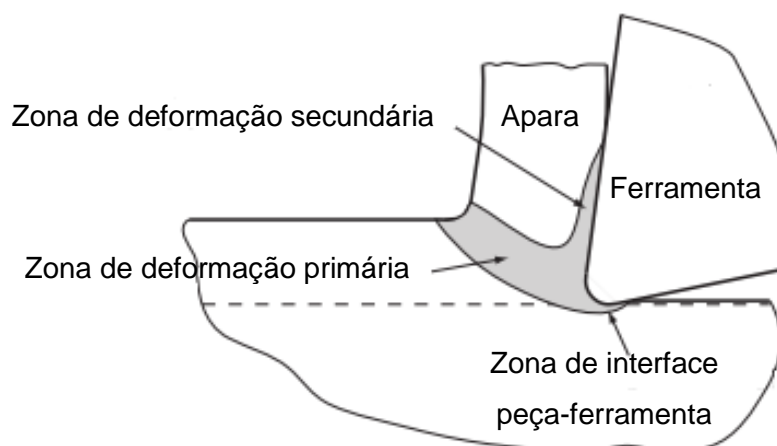


Figura 2.1 - Diferentes Zonas de deformação (Gubbels, 2006)



## 2.5 Acabamento da superfície

Granado et al. (2006) avaliaram a rugosidade superficial do polimetilmetacrilato (PMMA), utilizando o processo de torneamento, através de uma ferramenta de diamante monocristalina. Os parâmetros de corte utilizados foram: os avanços de 5, 10, 15 e 20  $\mu\text{m}/\text{rot}$ , profundidade de corte de 4 e 10  $\mu\text{m}$  e uma velocidade de corte constante de 50.26 m/min. Foi usado óleo sintético solúvel em água com o objetivo de lubrificar e refrigerar (MQL <60 ml/h). Neste estudo concluíram que o aumento do avanço leva a um pior acabamento superficial. Os melhores resultados foram obtidos para um avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{rot}$ , uma profundidade de corte de 10 mm onde obtiveram uma rugosidade ( $R_a$ ) entre 0.030  $\mu\text{m}$  e 0.052  $\mu\text{m}$ .

Maciel et al. (2010) estudaram a maquinagem de três polímeros (POM, NYLON 6 e PP) num torno CNC modelo BNC 2260X da marca SINITRON. As ferramentas de corte utilizadas eram destinadas a materiais não ferrosos, utilizando a profundidade de corte constante de 2.0 mm, as velocidades de corte de 200 e 250 m/min e três avanços (0.04, 0.1 e 0.15 mm/rot). Estes autores utilizaram ar frio como refrigeração, em comparação a maquinagem a seco e com fluido de corte emulsionável. Neste estudo verificou-se que os materiais poliméricos tinham um comportamento próximo dos materiais metálicos, sendo os materiais poliméricos influenciados principalmente pelo avanço e só depois pela velocidade de corte. Materiais poliméricos com um módulo de elasticidade pequeno apresentam um comportamento aleatório na rugosidade devido a sua baixa ductilidade. A utilização de ar frio como refrigerante não se revelou ser uma boa solução, devido aos valores da rugosidade obtidos não serem influenciados pelo mesmo, concluindo que a maquinagem a seco seria a melhor alternativa.

Ritter & Farias (2011) estudaram a influência do avanço, da velocidade e da profundidade de corte na rugosidade superficial de um compósito de polipropileno (PP) reforçado com casca de arroz pelo processo de torneamento. Sendo que os valores utilizados neste estudo para o avanço foram 0.102, 0.205 e 0.410 mm/rot, as velocidades de corte de 50, 100 e 200 m/min e 1.0, 2.0 e 4.0 mm para a profundidade de corte. Constatou-se que o avanço e a profundidade de corte exercem uma influência significativa na força de corte, que cresce a medida que o avanço e a profundidade de corte aumentam. Por outro lado, a velocidade de corte não apresentou influência nesta força - os autores justificam este resultado devido ao uso de velocidades de corte superiores a 50 m/min. Quanto à

rugosidade média (Ra) esta é influenciada principalmente pelo valor do avanço, obtendo-se os melhores resultados para a menor velocidade de avanço.

Pawade & Balasubramaniam (2012) investigaram o efeito dos parâmetros de corte na qualidade superficial do nylon e polipropileno obtido através do processo de torneamento. Os parâmetros escolhidos foram o avanço, velocidade e profundidade de corte e o ângulo de folga de ferramentas em carboneto. Através de uma análise, utilizando o método ANOVA para quantificar o efeito de cada parâmetro na qualidade da superfície, chegaram a conclusão que a velocidade de avanço era o parâmetro mais influente seguido do ângulo de folga. A profundidade de corte apresentou pouca influência, havendo pequenas variações na percentagem de cada fator para o caso de cada polímero. Os melhores resultados foram obtidos para baixos valores de profundidade de corte e de velocidades de avanço com o maior ângulo de folga, visto este diminuir à força de atrito a medida que aumenta.

## **2.6 Síntese**

Na Tabela 2.1 são apresentados alguns dos parâmetros e ferramentas de corte, bem como alguns resultados obtidos nas investigações anteriormente referidas.

Outros parâmetros de corte utilizados na maquinagem de polímeros foram obtidos na empresa *QUADRANT* – Tabela 2.2. A empresa recomenda o uso de ferramentas de carbonetos sinterizados com geometrias positivas e indica algumas soluções para possíveis problemas que possam surgir no torneamento de polímeros - Tabela 2.3.

**Tabela 2.1 - Parâmetros de corte e respectivos resultados, em termos de rugosidade de superfície**

Autor	Material	Ferramenta	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Salles & Gonçalves (1998)	UHMWPE	Carbonetos	[160 – 400]	[50 – 250]	–	[4 – 6]
Granado et al. (2003)	PMMA	PCD	50	[5 – 20]	[4 – 10]	[0.03 – 0.05]
Lapa (2007)	PEEK	K20 PCD	[150 – 377]	[50 – 200]	500	[0.8 – 2.6]
Fetecau et al. (2008)	HMWPE PET PA 6	K20	[24 – 150]	[24 – 300]	[500 – 2000]	–
Davim et al. (2009)	PA 66	PCD CVDD K15-KF K15	70	[10 – 80]	150	[0.9 – 2.3]
Maciel et al. (2010)	POM Nylon 6 PP	Carbonetos	[200 – 250]	[40 – 150]	2000	–
Keresztes et al. (2011)	UHMWPE POM C PA 6	–	[50 – 200]	[25 – 200]	[100 – 2000]	–
Pawade & Balasubramaniam (2012)	Nylon PP	Carbonetos	[80 – 290]	[10 – 90]	[20 – 80]	–

**Tabela 2.2 - Parâmetros de corte, QUADRANT**

Material	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rev}$ ]	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]
UHMWPE			
PA6	150 – 180	250 – 380	3800
POM-H	180 – 200	100 – 180	630
PET-P			

**Tabela 2.3 - Problemas e possíveis causas dos mesmos**

<b>Dificuldades</b>	<b>Possíveis causas</b>
Fusão da superfície	Insuficiente folga lateral Avanço muito lento Velocidade de rotação muito elevada
Acabamento rugoso	Excesso de alimentação Ângulo de folga incorreto Aresta afiada da ferramenta (é obrigatório ter um ligeiro raio de ponta)
Rebarbas na borda de Corte	Cantos pontiagudos sem chanfro Ângulo de folga insuficiente
Fratura da apara	Elevado ângulo positivo de ataque
Vibrações	Elevado raio de ponta da ferramenta Elevada largura de corte



## 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

---

### 3.1 Materiais ensaiados

Os materiais ensaiados nesta investigação foram os seguintes termoplásticos adquiridos à empresa *Lanema*<sup>®</sup>: o politereftalato de etileno (PET), polioximetileno (POM-C), o policloreto de vinil (PVC), Polietileno de elevado peso molecular (HMWPE) e o Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMWPE).

Do catálogo da *Lanema*<sup>®</sup> foram retiradas as principais características e aplicações dos materiais testados.

#### 3.1.1 Politereftalato de Etileno (PET)

Para este trabalho foi utilizado um politereftalato de etileno (PET), que é um PET cristalino no estado virgem. As suas propriedades específicas fazem com que este material seja especificamente adaptado para peças mecânicas de precisão expostas a cargas elevadas e sujeitas a grande desgaste.

As características principais são:

- Elevada resistência mecânica, rigidez e dureza;
- Muito boa resistência à fluência;
- Coeficiente de atrito baixo e uniforme;
- Excelente resistência ao desgaste;
- Muito boa estabilidade dimensional;
- Fisiologicamente inerte.

Principais aplicações:

- Casquilhos, guias e rodízios;
- Engrenagens de baixo módulo sem impacto;
- Raspadores para produtos alimentares e similares;
- Componentes para bombas na indústria alimentar;
- Próteses dentárias;
- Peças isoladoras;

- Peças de precisão.

### **3.1.2 Polioximetileno (POM-C)**

O polioximetileno (POM-C) escolhido foi o tipo ERTACETAL C, que é um material com maior estabilidade dimensional do que as poliamidas apesar de possuir uma resistência inferior ao desgaste.

As características principais são:

- Elevada resistência mecânica;
- Elevado módulo de elasticidade;
- Boa resistência à fluência;
- Elevada resistência ao impacto inclusive a baixas temperaturas;
- Excelente estabilidade dimensional;
- Boas propriedades de deslizamento e resistência ao desgaste;
- Baixa absorção de umidade;
- Elevada resistência a químicos;
- Fácil maquinação.

Principais aplicações:

- Peças de precisão;
- Rodas dentadas de módulo pequeno;
- Acoplamentos, luvas, elementos de válvulas;
- Casquilhos.

### **3.1.3 Policloreto de vinil (PVC)**

O PVC, ou Policloreto de vinil é um material rígido, de uma massa dura, fisiologicamente atóxico e de peso específico  $1,40 \text{ g/cm}^3$ . Sendo um termoplástico, o Policloreto de vinil endurece com o frio e suaviza com o calor. Por esta razão, a sua resistência mecânica aumenta mesmo a baixas temperaturas e a sua resistência ao impacto diminui. Por outro lado a partir dos  $40^\circ\text{C}$  o material começa a perder resistência mecânica e a ganhar resistência ao impacto. Até esta temperatura ser atingida o material não sofre alterações significativas.

As características principais são:

- Material rígido;
- Fisiologicamente atóxico;
- Alta resistência mecânica;
- Boa resistência ao impacto.

Principais aplicações:

- Revestimentos antiácidos, depósitos e de paredes;
- Fabrico de bombas e seus elementos;
- Fabrico de peças mecanizadas;
- Torres de lavagem de gases;
- Componentes e máquinas para a indústria química e galvanoplastia.

### **3.1.4 Polietileno de elevado peso molecular (HMWPE)**

O HMWPE é um polietileno de elevado peso molecular, também denominado PE 500, tem um peso molecular aproximadamente de 500.000 g/mol. É um material fisiologicamente inerte, associa uma boa combinação de resiliência, rigidez e tenacidade, além de possuir uma boa resistência química e pode ser facilmente soldado.

As características principais são:

- Boa resistência química, ao desgaste e à abrasão;
- Boa resistência ao impacto, inclusive a baixas temperaturas;
- Reduzida absorção de água;
- Resistência mecânica e à deformação moderada;
- Muito boas propriedades dielétricas e bom isolamento elétrico;
- Boa resistência a altas radiações de energia;
- Fácil de maquinar

Principais aplicações:

- Placas de corte para mesas de trabalho da indústria alimentar;
- Elementos para drenagem de água;



- Partes de bombas em contacto com produtos agressivos;
- Depósitos de gasolina de automóveis;
- Varias aplicações mecânicas, químicas e elétricas.

### **3.1.5 Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMWPE)**

O UHMWPE é um polietileno de ultra elevado peso molecular, também denominado PE 1000 que tem um peso molecular aproximado de 5 milhões g/mol. Combina uma excelente resistência ao desgaste e à abrasão com uma excepcional resistência ao impacto, inclusive a temperaturas abaixo dos -200 °C.

As características principais são:

- Elevada resistência ao desgaste e à abrasão;
- Excelente resistência química;
- Elevada resistência ao impacto, mesmo a baixas temperaturas;
- Baixo coeficiente de fricção e muito baixa absorção de água;
- Resistência mecânica e à deformação moderada;
- Excelentes propriedades dielétricas e muito bom isolamento elétrico;
- Boa resistência a altas radiações de energia;
- Fácil maquinação.

Principais aplicações:

- Maquinaria de engarrafamento;
- Indústria de conservas e empacotamento;
- Indústrias químicas e de galvanização;
- Equipamento criogénico;
- Fusos para transportadoras;
- Indústria têxtil;
- Peças para bombas;
- Guias de corrente;

### 3.2 Propriedades principais dos materiais ensaiados

Na Tabela 3.1 são apresentadas as principais propriedades dos materiais ensaiados, sendo que o tipo de cristalinidade e a temperatura de transição vítrea foram retirados da obra dos autores Gnauck & Frundt (1991) citado por Maio (2012) e do autor Callister (2007), respetivamente. As restantes informações foram obtidas através dos catálogos da empresa *Lanema*<sup>®</sup>, à qual foi adquirido o material.

Tabela 3.1 - Propriedades dos materiais ensaiados

Propriedades	Unidades	HMWPE	UHMWPE	PET	POM-C	PVC
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	0.96	0.93	1.39	1.41	1.4
Condutividade térmica	W/K.m	0.40	0.40	0.29	0.31	0.14
Temperatura de fusão	°C	135	135	245	165	–
Temperatura de transição vítrea	°C	90	90	69	85	80
Módulo de Young	MPa	1300	750	3500	2800	>3100
Dureza (ISO 2039-1)	MPa	40	30	170	140	120
Cristalinidade		Semi-crist.	Semi-crist.	Semi-crist.	Semi-crist.	Amorfo

### 3.3 Torno CNC

A realização dos ensaios, do presente trabalho, foi na oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Para este efeito, utilizou-se o Torno CNC *Kingsbury MHP 50*, representado na Figura 3.1; com 18 kW de potência e rotação máxima de 4500 rpm. Este utiliza um controlador FANUC OT, possui uma torreta de armazenamento de ferramentas com 12 posições, e tem uma área de trabalho 200 X 550 mm<sup>2</sup>.



Figura 3.1 - Torno CNC Kingbury MHP 50

### 3.4 Ferramenta de corte utilizada

Nos ensaios realizados foram utilizadas as pastilhas triangulares TPGN 16 03 04 H13A - Figura 3.2 - que apresentam um raio de ponta ( $r_\epsilon$ ) de 0.4 mm. A sua fixação no porta-ferramentas CTGPL 2020K 16 - Figura 3.3 - permite obter a seguinte geometria: ângulo de folga ( $\alpha = 11^\circ$ ), ângulo de ataque ( $\gamma = 0^\circ$ ), ângulo de inclinação ( $\lambda = 0^\circ$ ) e um ângulo de posição ( $k_r = 91^\circ$ ).

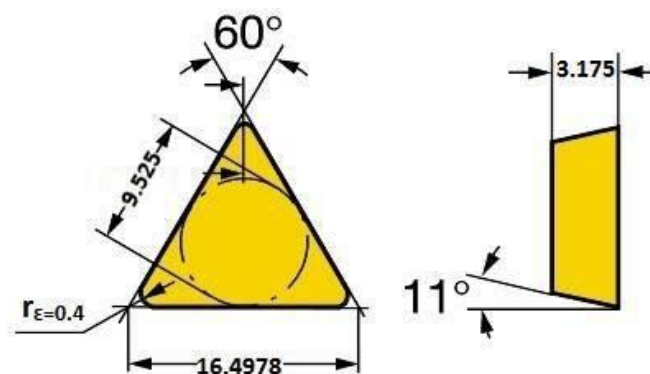


Figura 3.2 - Pastilhas usadas no torneamento (TPGN 16 03 04 H13A) (SANDVIK COROMANT, 2014a)

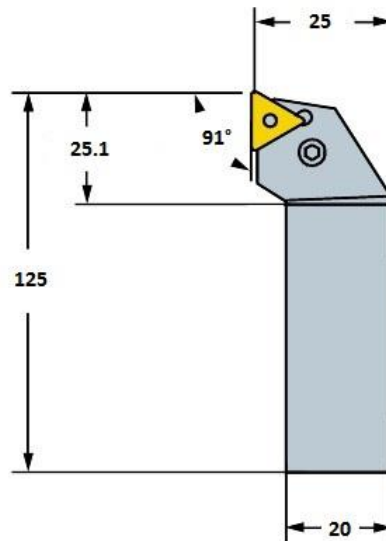


Figura 3.3 - Representação esquemática do porta-ferramentas CTGPL 2020K 16 (SANDVIK COROMANT, 2014b)

### 3.5 Provetes para o torneamento

Para todos os materiais ensaiados, foram usados provetes com diâmetro de 10 mm e um comprimento aproximado de 100 mm - Figura 3.4 a). As dimensões iniciais correspondem a um coeficiente de esbelteza ( $l/d$ ) 10. Esse comprimento foi determinado, após alguns testes, para se poder maquinar as extremidades e evitar que a pressão de aperto das buchas, 5 Bar, danificasse os provetes - Figura 3.5 b).



a) Provetes por maquinar



b) Provetes maquinado (Macromaquinagem)

Figura 3.4 - Exemplo de provetes utilizados nos ensaios.

### 3.6 Estratégia de corte

Nesta secção é apresentado a estratégia de corte adotada para os ensaios de corte, nomeadamente os ensaios de corte curtos. A Figura 3.5 representa a posição em que foram maquinadas as pistas de ensaio, onde, por segurança, foi deixado intervalo de 10 mm de comprimento entre a bucha de aperto e segunda pista. Foram maquinadas duas pistas com um comprimento de 10 mm, sendo que a primeira é maquinada com um comprimento em balanço de 30 mm e a segunda com 20 mm.

A ferramenta de corte avança com um determinado avanço sobre a peça e efetua o corte na primeira pista. Posteriormente, a ferramenta sobe para ajudar a evitar problemas relacionados com a temperatura. De seguida volta a descer para efetuar a segunda pista com um avanço diferente. A profundidade de corte mantém-se constante.

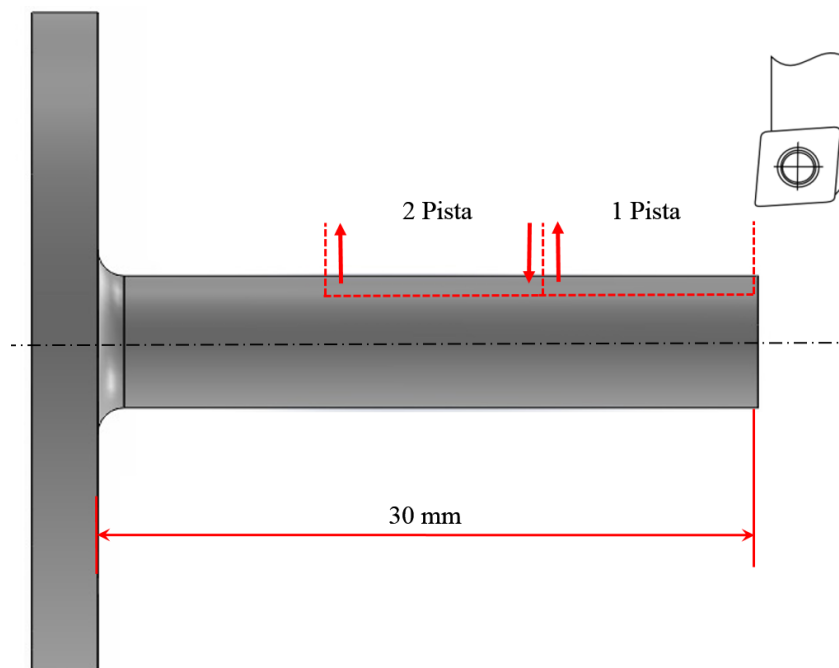


Figura 3.5 - Representação do provete maquinado

### 3.7 Parâmetros de maquinagem

Os parâmetros de maquinagem devem ser escolhidos cuidadosamente, visto que parâmetros apropriados levam à obtenção de peças com boa qualidade, quer a nível de qualidade superficial, dimensional como de forma.

### 3.7.1 Velocidade de corte

Devido às características reológicas dos polímeros a velocidade de corte desempenha um papel importante. A velocidade de corte vai afetar diretamente o tipo de apra produzida, o tamanho e a forma da zona de deformação. Outro fator importante a ter em consideração é a dependência da força de corte com a velocidade de corte, onde as baixas velocidades induzem o aumento das forças de corte. O aumento da velocidade de corte leva a diminuição das forças de corte envolvidas, Kobayashi (1984).

Por motivos de segurança e estabilidade dinâmica, a rotação máxima aplicada foi de 2500 rpm. Para evitar divergência da velocidade de corte para as diferentes escalas, a velocidade de corte máxima foi definida a 50 m/min.

### 3.7.2 Avanço

O avanço é um dos fatores mais importantes para a obtenção de uma peça com qualidade, especialmente em peças de tamanhos reduzidos, visto que, as forças de corte são diretamente influenciadas por este fator. Em principio, quanto menor for o avanço melhor sera a qualidade da superfície. No entanto, se forem usados avanços muito pequenos, a quantidade de calor removido da zona de corte torna-se muito pequena devido a baixa condutividade térmica dos polímeros. O que pode causar a queima em termoendurecidos e a fusão nos termoplásticos.

Foram utilizados quatro valores para analisar a velocidade de avanço. Estes vão ser valores reduzidos como pode ser observado na Tabela 3.2, visto o objetivo da dissertação ser a produção de micropeças.

Tabela 3.2 - Avanços utilizados nos ensaios

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]			
100	50	25	12.5

### 3.7.3 Profundidade de corte

A profundidade de corte na micromaquinagem é um parâmetro importante na formação da apra, pois se esta for elevada a apra torna-se ondulada e tende a enrolar tornando difícil manter as tolerâncias desejadas. Por outro lado, este parâmetro deve ser equilibrado com

a velocidade de corte visto que esta tende a partir a apara para velocidades elevadas. Liu and Melkote (2006), Azizur Rahman *et al* (2005) e Gindy (1978) advertem que com a utilização de pequenos valores de profundidade de corte, o processo de maquinagem tende a tornar-se uma ação de atrito (polimento) o que causa um aumento de temperatura e a deterioração da qualidade da superfície maquinada.

Os valores utilizados nos ensaios estão apresentados na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 - Profundidades de corte utilizadas nos ensaios**

Profundidade corte [ $\mu\text{m}$ ]		
400	200	100

#### **3.7.4 Índice de esbelteza**

As peças maquinadas têm de cumprir certos requisitos de modo a garantir as dimensões e as formas desejadas. Na produção de peças de dimensões muito reduzidas é necessário estudar o seu índice de esbelteza para verificar qual a dimensão máxima possível de maquinar. Se o comprimento for muito extenso para um determinado diâmetro a peça pode apresentar conicidade, outro defeito de forma ou em último caso fraturar.

A relação aconselhada entre o comprimento (l) e o diâmetro (d) de peças pequenas é de  $l \leq 5d$  (Ferraresi, 1970)

Para a avaliação dos parâmetros de maquinagem, em que o diâmetro é aproximadamente 10 mm o comprimento máximo não deve ser superior a 50 mm. Na etapa de miniaturização o comprimento máximo não deve superar os 10 mm para um diâmetro de 2 mm. No entanto, é preciso realçar que quanto maior o comprimento e menor for o diâmetro maior será a deflexão.

#### **3.8 Medição da temperatura**

Para verificar a temperatura atingida nos materiais durante o processo de corte foram utilizados dois métodos distintos, através de contato e por radiação, usando um Thermopar FLUKE 51 II e um Pirômetro FLUKE 62 mini para os respetivos métodos.

### 3.9 Métodos de caracterização da superfície

#### 3.9.1 Rugosímetro

Para a caracterização da superfície maquinada foi utilizada a rugosimetria. Foi utilizado um rugosímetro HommelWerke®T1000E - Figura 3.6.- com apalpador de diamante e impressora integrada. Apresenta uma resolução máxima de 0,01 µm, um campo de medição de cerca de 80 µm, um cut-off (LC) de 0,25 e 0,8 e uma categoria 1 de precisão segundo a norma DIN 4772. Utiliza o *software* designado *Turbo Datawin*.

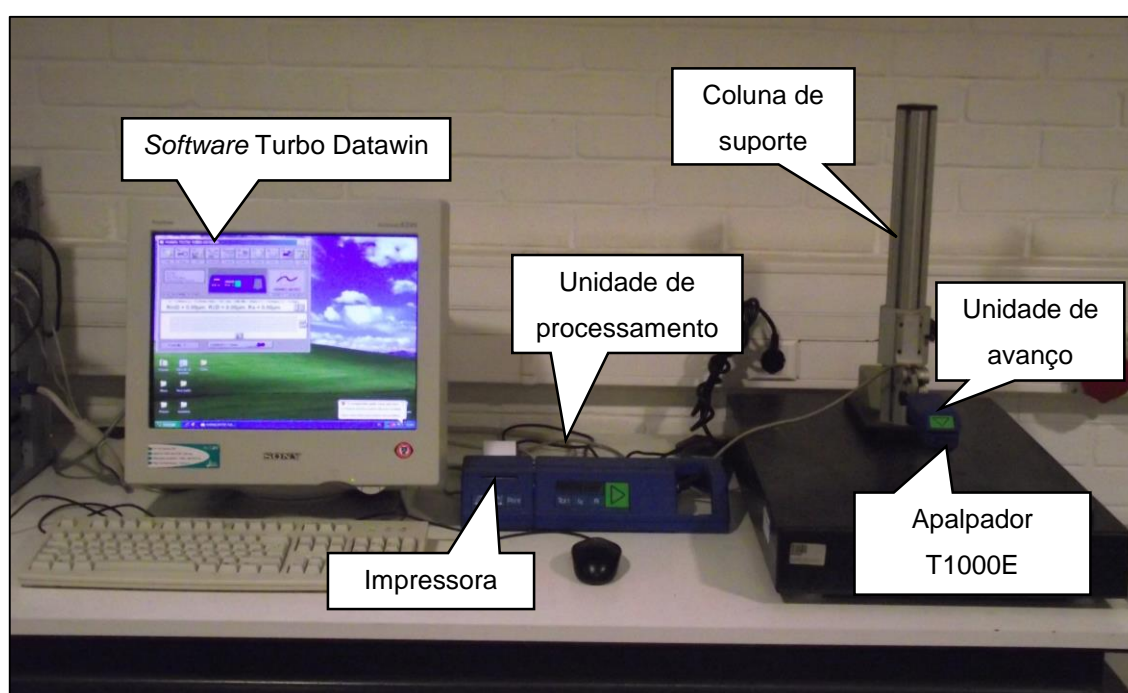


Figura 3.6 - Rugosímetro Hommel Tester T1000 E

Os parâmetros de amplitude selecionados para o âmbito deste estudo foram a rugosidade média aritmética ( $R_a$ ), e a amplitude máxima do perfil da rugosidade ( $R_t$ ) que respeitam a norma **ISO 4287/1**. O valor teórico de  $R_a$  ( $R_{ta}$ ) e  $R_t$  ( $R_{tt}$ ) é dado em µm pela equação 3.2 e 3.3 respetivamente, onde  $a$  é o avanço em mm/rot e  $r$  é o raio de ponta da ferramenta em mm.

$$R_{ta} = \frac{a^2}{32r} \times 1000 \quad (3.2)$$



$$R_{tt} = \frac{a^2}{8r} \times 1000 \quad (3.3)$$

A medição dos parâmetros de rugosidade de cada peça foi realizada em três pontos distintos separados cerca de 120°, como se pode observar na Figura 3.7. Os parâmetros utilizados para a medição da rugosidade foram: cut-off (Lc) de 0,25 mm e comprimento de palpagem (Lt) de 1,5 mm para as rugosidades (Ra) menores do que 0,5 µm e um cut-off (Lc) de 0,8 mm e comprimento de palpagem (Lt) de 4,8 mm para as rugosidades (Ra) superiores.

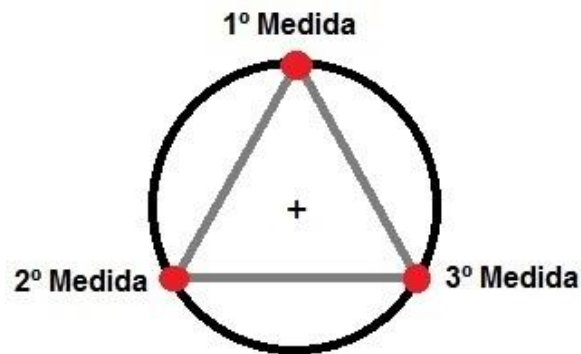


Figura 3.7 - Pontos de medição

### 3.9.2 Microscópio ótico

Para a avaliação de forma foi utilizado o diâmetro médio, o coeficiente de variação do diâmetro ( $CV_D$ ) e do ângulo ( $CV_A$ ) - Eq. 3.5.

$$CV_D = CV_A = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (3.5)$$

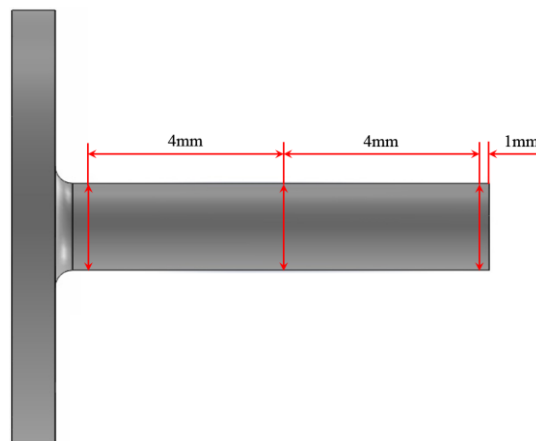
onde  $\bar{x}$  é a média os valores medidos e o  $s$  é o desvio padrão dado pela Eq. 3.6

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.6)$$

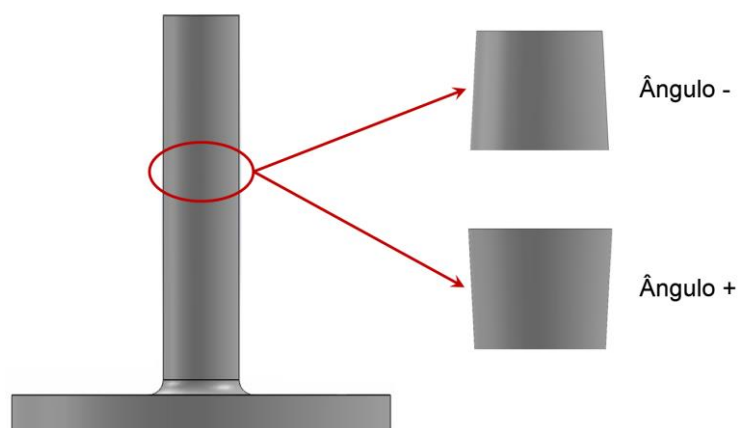
sendo  $n$  o numero de valores medidos.

Os valores para a obtenção do diâmetro médio e dos coeficientes de variação, foram obtidos em três posições do provete - nomeadamente no início, meio e fim. Devido ao defeito provocado pelo raio de ponta na base e a alguns provetes apresentarem erros na extremidade, com o intuito de evitar os possíveis erros na medição que seriam provocados por estes, as medições foram efetuadas a 4 mm do meio do provete, como pode ser observado na Figura 3.8.

A aquisição do ângulo foi efetuada para determinar o nível de irregularidades da superfície das peças. A Figura 3.9 mostra como foram obtidos os valores dos ângulos medidos nos provetes ensaiados.



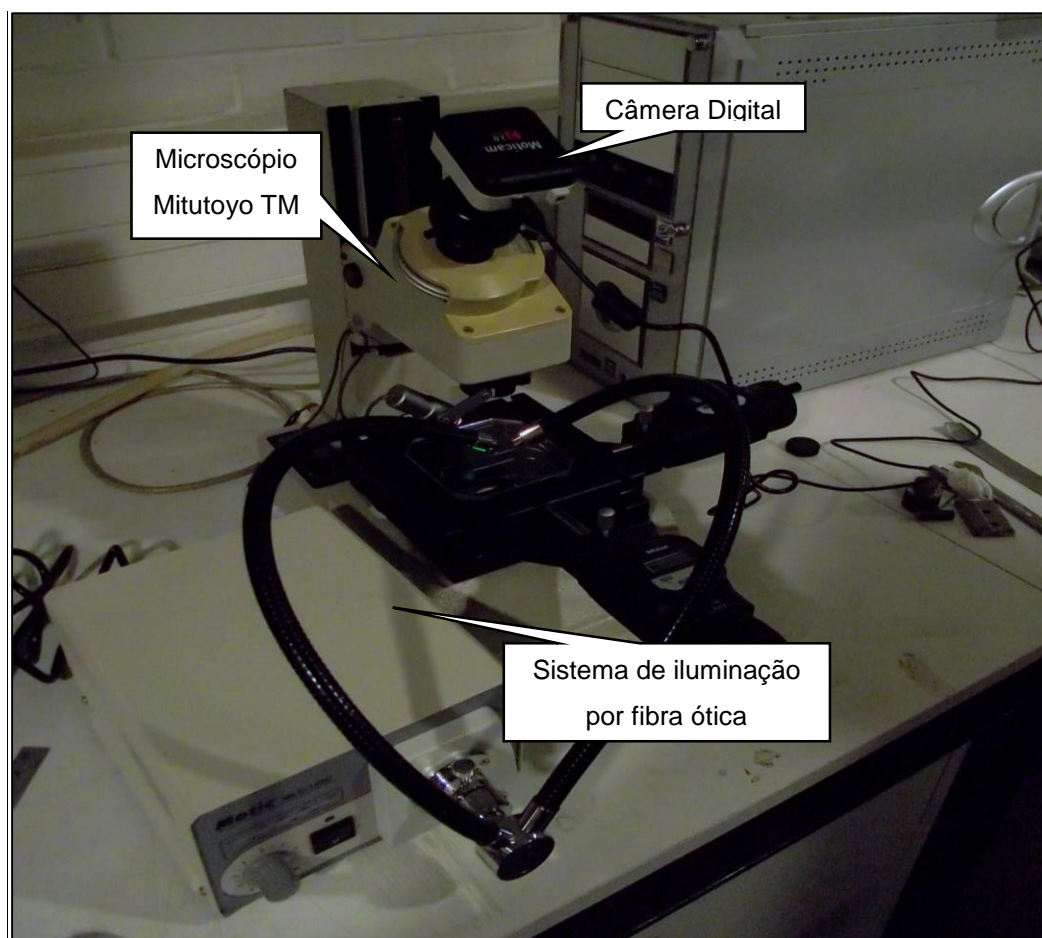
**Figura 3.8 - Local de medição para o diâmetro médio e coeficiente de variação do diâmetro e do ângulo**



**Figura 3.9 - Aquisição dos ângulos para coeficiente de variação do ângulo**

Para este estudo utilizou-se um microscópio ótico Mitutoyo TM, com uma objetiva de ampliação 30X. Utilizado o *software* Motic Image, partindo de imagens recolhidas com uma câmara digital Moticom com 2.0 MP de resolução diretamente da ocular do microscópio. A iluminação foi feita através de um sistema de fibra ótica.

O conjunto de dispositivos utilizados para a avaliação da forma dos provetes encontram-se na Figura 3.10.



**Figura 3.10 - Microscópio ótico Mitutoyo TM e sistema de aquisição de imagem e iluminação utilizados**

### **3.10 Síntese**

Na Figura 3.11 encontra-se um esquema da organização do procedimento experimental adotado no presente trabalho.

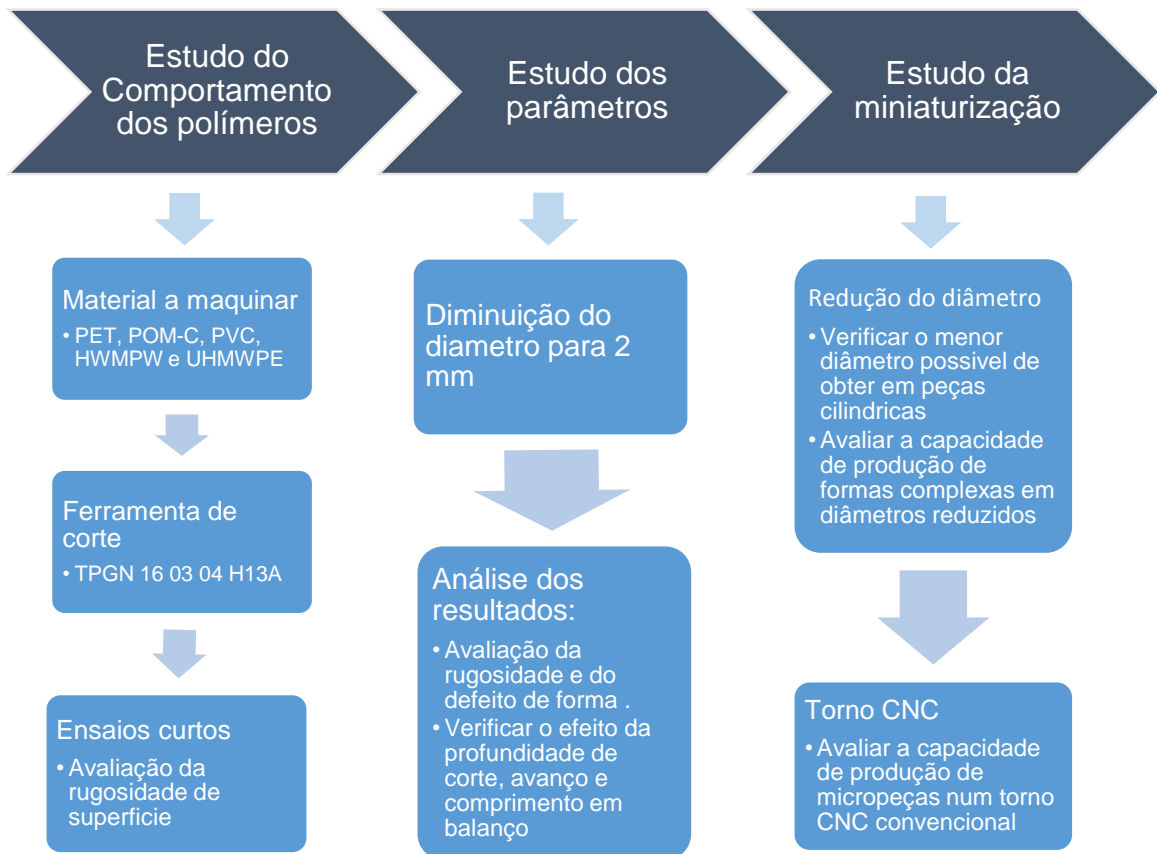


Figura 3.11 - Esquema do procedimento experimental



## 4 RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO

---

Inicialmente foi efetuado um estudo para averiguar o comportamento dos polímeros perante a maquinagem, utilizando uma velocidade de corte de 50 m/min e os dois comprimentos em balanço previamente escolhidos (20 e 30 mm). Para esta velocidade e utilizando o menor avanço (12.5  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ) foi averiguada a temperatura atingida pela ferramenta de corte. Para as condições testadas não se verificou uma alteração significativa na temperatura relativamente às condições iniciais (20 °C).

Na Tabela 4.1, podem observar-se os melhores valores obtidos na rugosidade ( $R_a$  e  $R_t$ ) para cada material ensaído bem como algumas das suas propriedades. Observa-se que nos materiais mais macios e com menor módulo de elasticidade (HMWPE/UHMWPE) o acabamento superficial, nomeadamente a rugosidade ( $R_a$  e  $R_t$ ), piora. Os valores das rugosidades obtidas para todos os provetes testados encontram-se no Anexo A.

Apropósito, Xiao and Zhang (2002) afirmam que, os termoplásticos com uma menor resistência mecânica apresentam uma maior rugosidade nas superfícies obtidas após maquinagem.

**Tabela 4.1 - Melhores resultados obtidos na rugosidade de cada material ensaído e algumas das suas propriedades (adaptado de Lanema (2014))**

Parâmetros	Materiais				
	PET	PVC	POM-C	HMWPE	UHMWPE
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.24	0.27	0.31	0.62	1.24
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	1.73	1.68	2.29	5.21	7.53
Módulo de Young [MPa]	3500	>3100	2800	1300	750
Dureza (ISO 2039-1) [MPa]	170	120	140	40	30

Verifica-se que nestes materiais, o comprimento em balanço exerce uma maior influência no valor da rugosidade. No material mais macio e com menor módulo de elasticidade (UHMWPE) obtêm-se erros de forma no maior comprimento em balanço para o menor avanço. Este efeito é causado, provavelmente, devido a existência de vibrações mais

acentuadas na extremidade do provete que apesar de curto, devido ao seu baixo módulo de elasticidade, não apresenta a rigidez necessária.

Foi averiguado o efeito da velocidade de corte na rugosidade superficial. Esta análise foi efetuada utilizando uma rotação de 2500 rpm combinada com três diâmetros diferentes, 10, 5 e 2 mm, correspondendo a diferentes velocidades de corte 79, 39 e 16 m/min respetivamente.

Na tabela 4.2, pode ser observado o efeito da velocidade de corte na rugosidade média aritmética (Ra). Os parâmetros utilizados neste teste foram os parâmetros onde obteve-se o melhor acabamento superficial. Verifica-se que com a diminuição da velocidade de corte, a rugosidade Ra aumenta, conforme anteriormente verificado por Lapa (2007) e Fetecau et al. (2008).

**Tabela 4.2 - Efeito da redução da velocidade de corte no valor da rugosidade (Ra)**

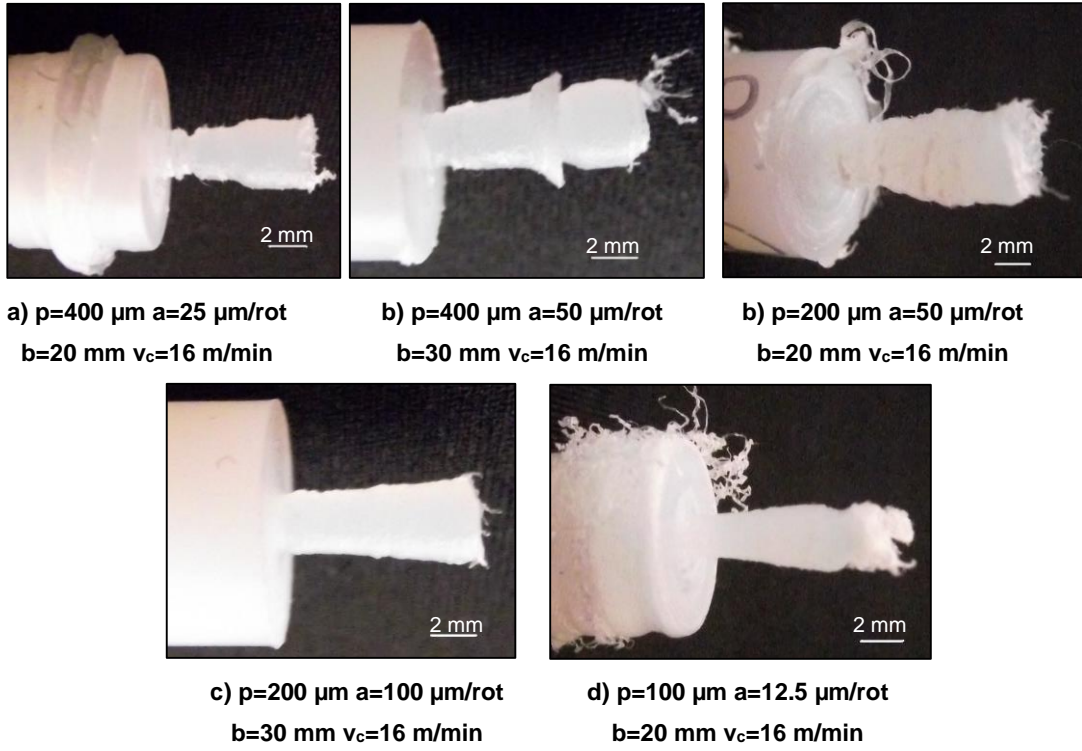
Material	Avanço [µm/rot]	Profundidade de Corte [µm]	Ra [µm]		
			79 [m/min] (Ø 10 [mm])	39 [m/min] (Ø 5 [mm])	16 [m/min] (Ø 2 [mm])
PET	50	100	0.27	0.38	0.61
POM-C	12,5	100	0.46	0.61	-
PVC	12,5	200	0.26	0.33	0.35

#### 4.1 Avaliação dos parâmetros

Para o processo de miniaturização foi efetuado um segundo estudo. Este consistiu na utilização dos parâmetros previamente escolhidos, utilizando uma velocidade de corte ( $v_c$ ) de 16 m/min, num diâmetro de 2 mm - com o intuito de se observar o efeito dos parâmetros na miniaturização.

Verifica-se que o UHMWPE e o HMWPE apresentam elevada rugosidade e defeitos de forma, Figura 4.1, independentemente dos parâmetros utilizados, o que nos leva a concluir que os materiais mais macios não são facilmente maquináveis. Observa-se que nestes materiais pode haver a formação de uma espessura não cortável, que tende a ser arrastada para o final do provete, intensificando-se este facto, nas maiores profundidades com os menores avanços - Figura 4.2.

UHMWPE



HMWPE

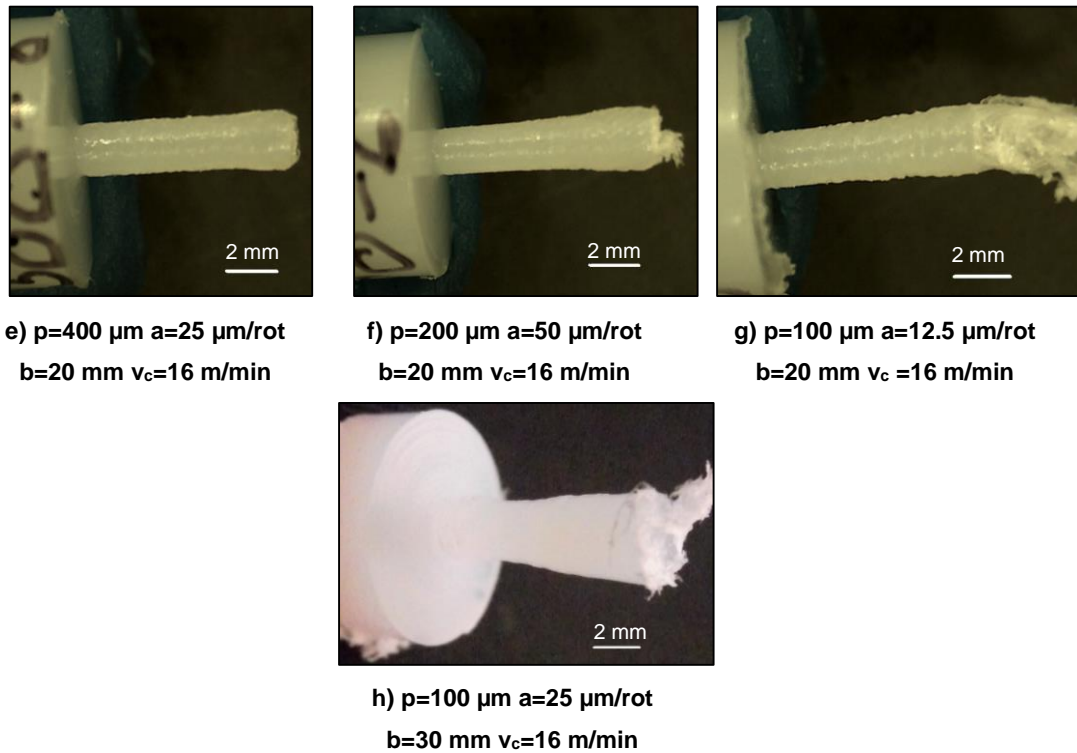
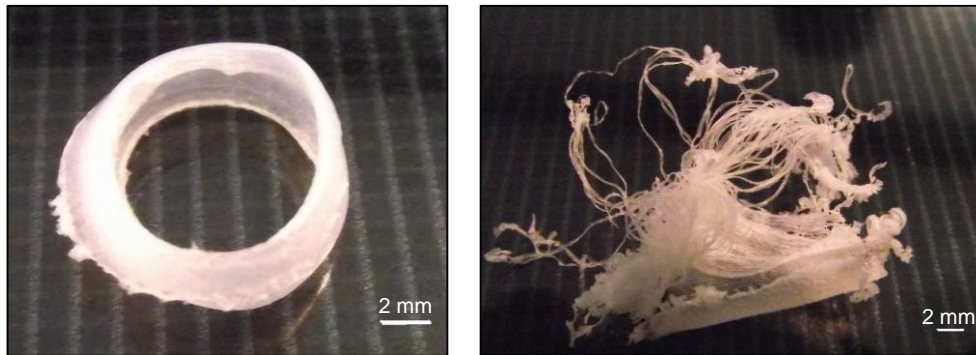


Figura 4.1 - Provetes com elevada rugosidade e defeito de forma





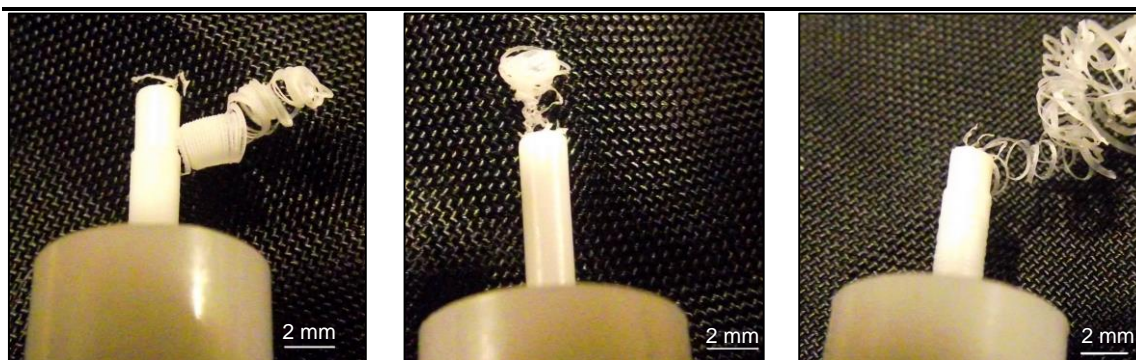
a) Maior profundidade de corte

b) Menor profundidade de corte

Figura 4.2 - Material não cortado

No caso do POM-C, PET e PVC verifica-se por vezes o enrolamento da apara a volta do provete, como pode ser observado na Figura 4.3.

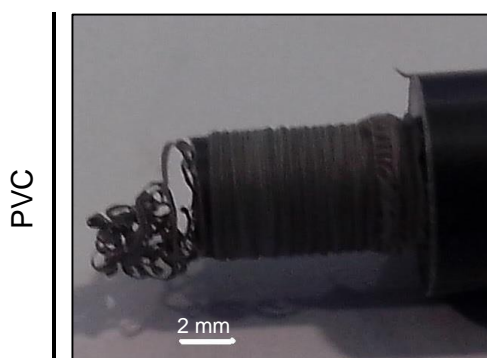
POM-C



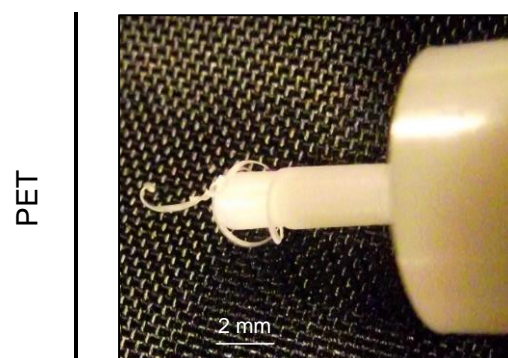
a)  $p=200 \mu\text{m}$   $a=100 \mu\text{m/rot}$   
 $v_c=16 \text{ m/min}$

b)  $p=100 \mu\text{m}$   $a=25 \mu\text{m/rot}$   
 $v_c=16 \text{ m/min}$

c)  $p=200 \mu\text{m}$   $a=50 \mu\text{m/rot}$   
 $v_c=16 \text{ m/min}$



d)  $p=400 \mu\text{m}$   $a=100 \mu\text{m/rot}$   
 $v_c=16 \text{ m/min}$



e)  $p=200 \mu\text{m}$   $a=100 \mu\text{m/rot}$   
 $v_c=16 \text{ m/min}$

Figura 4.3 - Apara enrolada no provete

#### 4.1.2 Politereftalato de Etileno (PET)

Na Tabela 4.3 podem ser observados os parâmetros de rugosidade medidos nos provetes de PET (média de três medidas) em função do avanço e da profundidade de corte. Das condições aplicadas, os melhores valores para Ra e Rt foram obtidos com um avanço de 12.5  $\mu\text{m}/\text{rot}$ , profundidade de corte de 200  $\mu\text{m}$  e um comprimento em balanço de 20 mm.

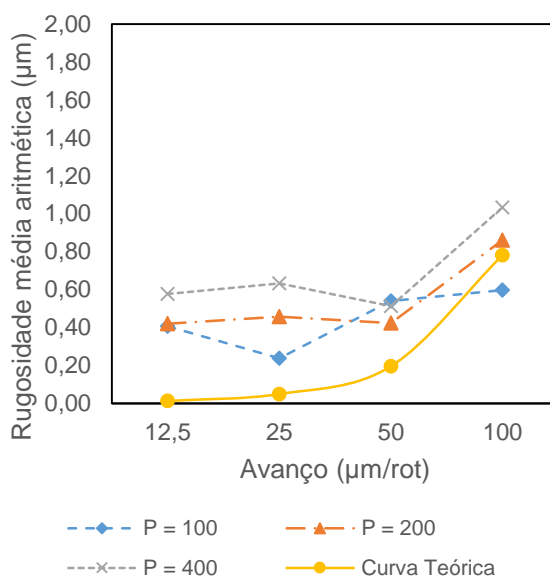
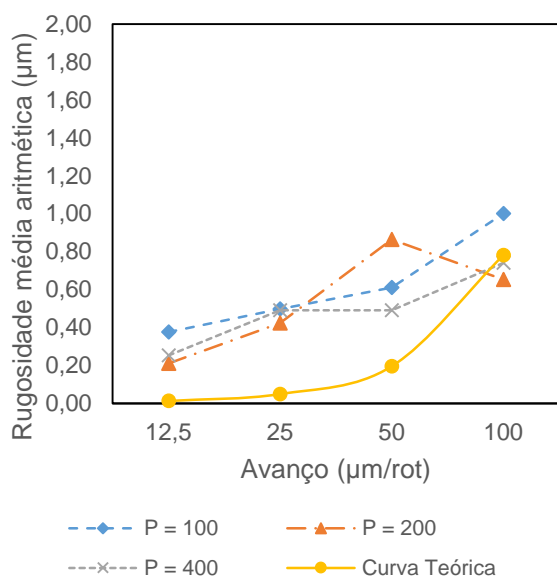
Tabela 4.3 - Valores das rugosidades medidas no PET ( $v_c = 16 \text{ m/min}$ )

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Balanço [mm]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]			Rt [ $\mu\text{m}$ ]		
		Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]			Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
		100	200	400	100	200	400
12.5	30	0.41	0.42	0.58	3.11	3.10	4.77
	20	0.38	<b>0.21</b>	0.25	3.49	<b>1.62</b>	2.03
25	30	0.24	0.46	0.63	1.93	3.48	4.35
	20	0.50	0.42	0.49	4.71	3.61	4.71
50	30	0.54	0.42	0.51	4.27	3.34	3.66
	20	0.61	0.86	0.49	4.17	6.15	3.47
100	30	0.60	0.86	1.03	3.83	6.75	4.74
	20	1.00	0.65	0.74	6.02	3.80	4.33

A variação dos valores da rugosidade média aritmética (Ra) para um comprimento em balanço de 20 mm em função do avanço para diferentes profundidades de corte está representado na Figura 4.4 a). Confirma-se que a profundidade de corte não é o parâmetro de maior influência no valor de Ra, mas sim o avanço. As curvas dos valores obtidos possuem um comportamento idêntico ao da curva teórica (Rta), obtida através da equação 3.2, apresentando maioritariamente valores mais elevados, dado que na Rta não são contemplado, por exemplo, os efeitos de vibração da ferramenta e da peça.

No caso do maior comprimento em balanço (30 mm), Figura 4.4 b), observa-se que o avanço parece ter uma menor influência. Este efeito pode ser provocado pelo acréscimo de vibrações, provocado pelo aumento do comprimento do provete.

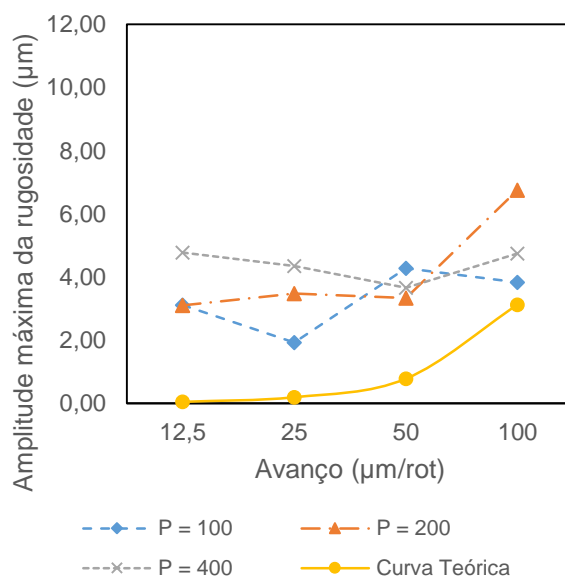
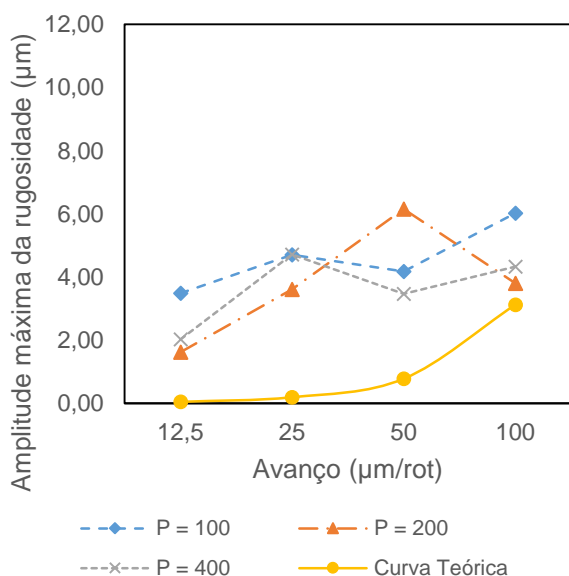
A amplitude máxima da rugosidade (Rt), Figura 4.5, apresenta um comportamento idêntico à rugosidade média aritmética (Ra) para os respetivos comprimentos em balanço, apesar dos valores se encontrarem mais distantes da curva teórica (Rtt) - obtida através da equação 3.3.



a) comprimento em balanço de 20 mm

b) comprimento em balanço de 30 mm

Figura 4.4 - Rugosidade média aritmética do PET em função do avanço e da profundidade de corte



a) comprimento em balanço de 20 mm

b) comprimento em balanço de 30 mm

Figura 4.5 - Amplitude máxima da rugosidade do PET em função do avanço e da profundidade de corte

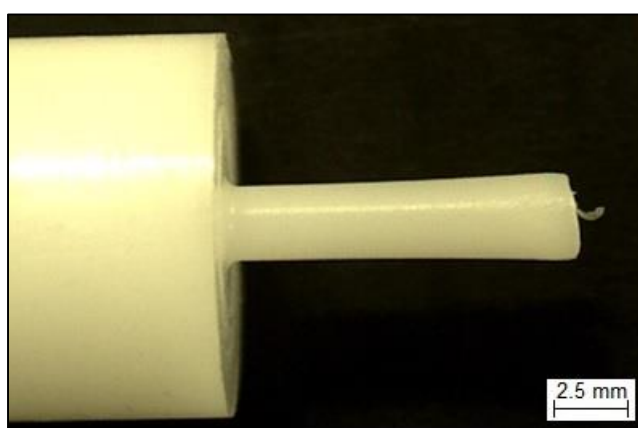
Na Tabela 4.4 são apresentados os fatores utilizados para averiguar a forma dos provetes de PET nomeadamente o diâmetro médio, o coeficiente de variação do diâmetro e do ângulo, obtidos através da equação 3.5, em função do avanço e da profundidade de corte. Das condições aplicadas, observa-se que os avanços de 12,5 e 25  $\mu\text{m/rot}$  originaram no geral os melhores resultados, onde o menor coeficiente de variação do diâmetro foi obtido

com o menor comprimento em balanço com um avanço de 12.5  $\mu\text{m}/\text{rot}$  e uma profundidade de corte de 400  $\mu\text{m}$ . No caso do coeficiente de variação do ângulo o melhor valor foi obtido para um comprimento em balanço de 30 mm através de um avanço de 100  $\mu\text{m}/\text{rot}$  e uma profundidade de corte de 200  $\mu\text{m}$ .

Tabela 4.4 - Fatores de avaliação da forma obtida nos provetes de PET ( $v_c = 16 \text{ m/min}$ )

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Balanço [mm]	Diâmetro médio [mm]			CV <sub>diâmetro</sub>			CV <sub>ângulo</sub>		
		Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]								
		100	200	400	100	200	400	100	200	400
12.5	30	2.01	2.05	2	3.32	4.51	<b>2.96</b>	149.96	111.63	404.29
	20	2	2.04	2.02	2.71	3.14	2.25	57.14	37.99	78.52
25	30	2.05	2.05	2.04	4.12	4.42	4.71	120.48	331.44	74.64
	20	1.99	2.04	2.03	3.11	4.14	3.76	127	563.9	52.65
50	30	2.03	2.09	2.09	3.79	6.52	5.99	380.22	115.94	998.36
	20	2.01	2.04	2.01	4.46	6.34	4.2	1014.9	97.45	119.44
100	30	2.11	2.12	2.06	8.17	7.86	7.34	115.86	<b>30.48</b>	1424.9
	20	2.04	2.05	2.02	7.09	6.17	4.36	194.34	196.53	30.53

Verifica-se a existência de alguma conicidade em todas as peças produzidas. Um exemplo de uma peça com defeito de forma pode ser observado na Figura 4.6. O aspecto superficial de todos os provetes pode ser observado em anexo, nas Tabelas B.1 e B.2.



$p=100 \mu\text{m}$   $a=100 \mu\text{m}/\text{rot}$   $b=30 \text{ mm}$   $v_c = 16 \text{ m/min}$

Figura 4.6 - Provette de PET

### 4.1.3 Polioximetileno (POM-C)

Na Tabela 4.5 podem ser observados os parâmetros de rugosidade medidos nos provetes de POM-C (média de três medidas) em função do avanço e da profundidade de corte. Das condições aplicadas, o melhor valor de Ra e Rt foi obtido com um avanço de 25  $\mu\text{m}/\text{rot}$ , profundidade de corte de 400  $\mu\text{m}$  e um comprimento em balanço de 20 mm. Os valores das rugosidades não apresentados não foram possíveis de medir.

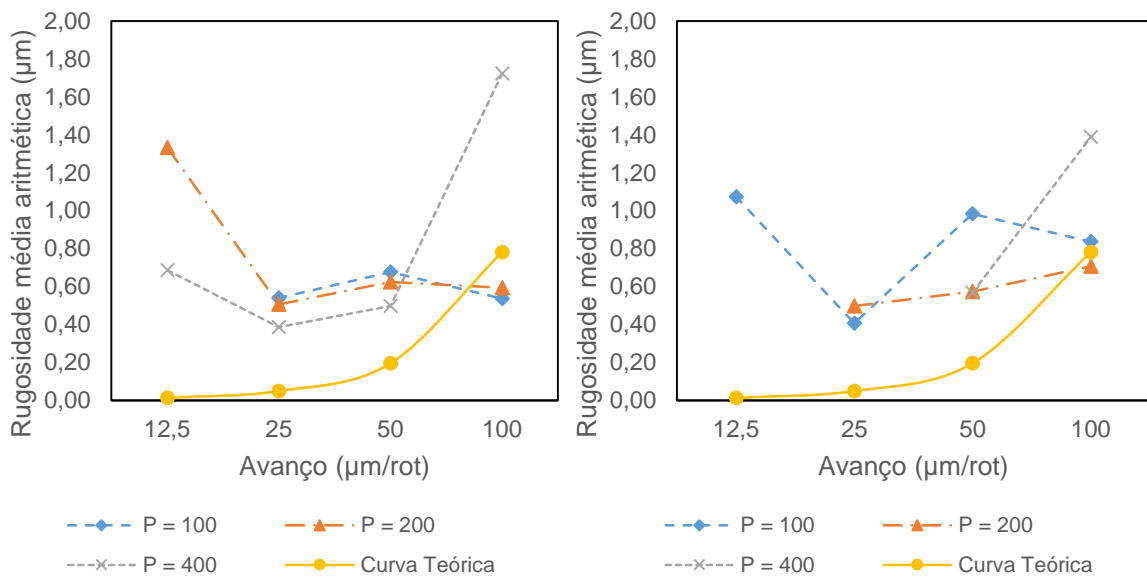
Tabela 4.5 - Valores das rugosidades medidas no POM-C ( $v_c= 16 \text{ m/min}$ )

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Balanço [mm]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]			Rt [ $\mu\text{m}$ ]		
		Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]			Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
		100	200	400	100	200	400
12.5	30	1,07	-	-	6.43	-	-
	20	-	1.33	0.69	-	8.33	4.01
25	30	0.41	0.50	-	3.21	3.59	-
	20	0.54	0.51	<b>0.39</b>	4.21	3.91	<b>2.96</b>
50	30	0.98	0.57	0.57	7.12	4.33	4.67
	20	0.68	0.62	0.50	4.99	4.83	3.79
100	30	0.84	0.71	1.39	6.55	6.51	9.19
	20	0.54	0.59	1.72	4.63	3.69	9.85

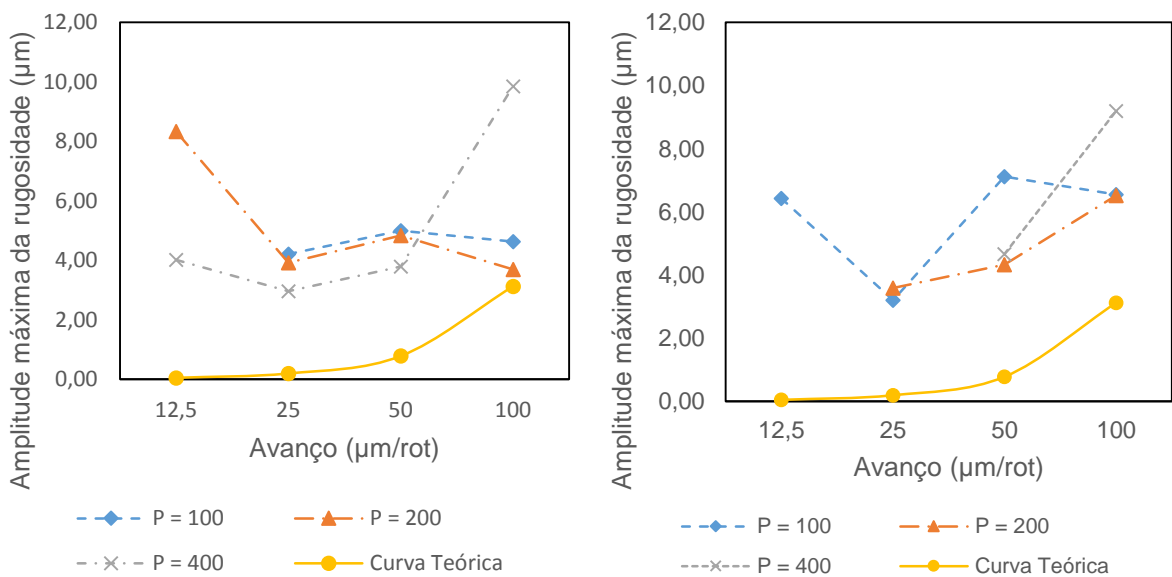
A Figura 4.7 a) apresenta a variação da rugosidade média aritmética (Ra) do POM-C em função do avanço (a) para diferentes profundidades de corte (p) para um comprimento em balanço de 20 mm. Observa-se as menores profundidades de corte não são influenciadas pela variação do avanço, à exceção do menor avanço que obteve elevadas rugosidades. Observa-se que só a maior profundidade de corte obteve uma curva idêntica a curva teórica (Rta) - obtida através da equação 3.2.

Para um comprimento em balanço de 30 mm, Figura 4.7 b), é observado um comportamento bastante irregular para a menor profundidade de corte, apesar dos valores obtidos apresentarem um Ra idêntico ao obtido pelo menor comprimento em balanço.

A amplitude máxima da rugosidade (Rt), Figura 4.8, apresenta um comportamento idêntico a Ra à exceção dos valores estarem mais distantes da curva teórica (Rtt) - obtida através da equação 3.3.



**a) comprimento em balanço de 20 mm**                      **b) comprimento em balanço de 30 mm**  
**Figura 4.7 - Rugosidade média aritmética do POM- em função do avanço e da profundidade de corte**



**a) comprimento em balanço de 20 mm**                      **b) comprimento em balanço de 30 mm**  
**Figura 4.8 - Amplitude máxima da rugosidade do POM-C em função do avanço e da profundidade de corte**

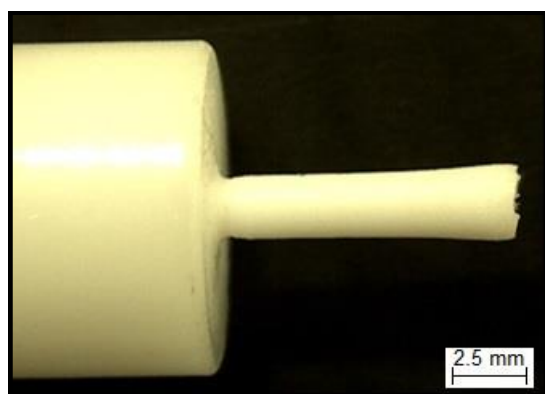
Na Tabela 4.6 podem ser observado os fatores utilizados para averiguar a forma dos provetes de POM-C nomeadamente o diâmetro médio, o coeficiente de variação do diâmetro e do ângulo, obtidos através da equação 3.5, em função do avanço e da profundidade de corte. Das condições aplicadas, obteve-se o menor coeficiente de variação de diâmetro para o um comprimento em balanço de 30 mm com um avanço de

12.5  $\mu\text{m}/\text{rot}$  e uma profundidade de corte de 400  $\mu\text{m}$ . No caso do coeficiente de variação do ângulo o melhor valor foi obtido para um comprimento em balanço de 30 mm através de um avanço de 100  $\mu\text{m}/\text{rot}$  e uma profundidade de corte de 200  $\mu\text{m}$ .

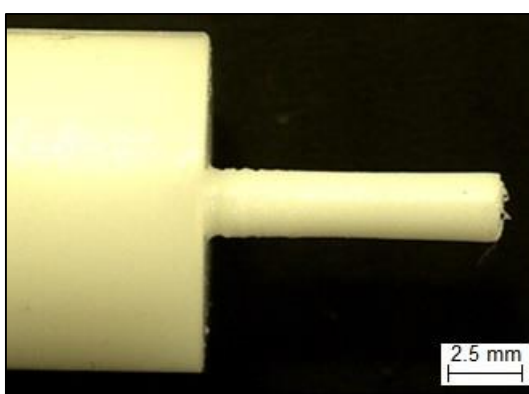
Tabela 4.6 - Fatores de avaliação da forma obtida nos provetes de POM-C ( $v_c=16$  m/min)

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Balanço [mm]	Diâmetro médio [mm]			CV <sub>diâmetro</sub>			CV <sub>ângulo</sub>		
		Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]								
		100	200	400	100	200	400	100	200	400
12.5	30	2.03	2.1	2.14	4.11	2.68	<u>1.22</u>	470.53	188.71	199.36
	20	2.07	2.08	2.02	1.28	3.1	2.65	91.22	141.51	469.73
25	30	2.04	2.09	2.09	3.35	3.07	1.63	180.65	3708.2	133.78
	20	2.01	2.06	2	2.49	3.56	2.94	377.43	177.86	808.13
50	30	2.01	2.04	2.04	3.57	4.37	3.42	55.62	69.97	91.22
	20	2.04	2.03	2.01	4.03	3.73	2.89	225.14	161.13	147.92
100	30	2.05	2.08	2.07	4.89	6.15	7.12	107.15	<u>51.59</u>	58.9
	20	2.02	2.03	2.02	3.99	4.17	7.64	74	583.22	382.09

Verifica-se a existência de alguma conicidade na maioria das peças produzidas. Um exemplo de uma peça com defeito de forma acentuado pode ser observado na Figura 4.9 a). Alguns provetes apresentavam alguma ondulação na superfície, Figura 4.9 b). O aspeto superficial de todos os provetes pode ser observado em anexo, nas Tabelas B.5 e B.6.



a) Provette com defeito de forma  
 $p=200$   $\mu\text{m}$   $a=25$   $\mu\text{m}/\text{rot}$   $b=30$  mm  
 $v_c=16$  m/min



b) Provette com ondulação  
 $p=400$   $\mu\text{m}$   $a=25$   $\mu\text{m}/\text{rot}$   $b=30$  mm  
 $v_c=16$  m/min

Figura 4.9 - Provetes de POM-C

#### 4.1.4 Policloreto de vinil (PVC)

Na Tabela 4.7 podem ser observados os parâmetros de rugosidade medidos nos provetes de PVC (média de três medidas) em função do avanço e da profundidade de corte. Das condições aplicadas, o melhor valor de Ra e Rt foi obtido com um avanço de 12.5  $\mu\text{m}/\text{rot}$ , profundidade de corte de 100  $\mu\text{m}$  e um comprimento em balanço de 30 mm.

Tabela 4.7 - Valores das rugosidades medidas no PVC ( $v_c = 16 \text{ m/min}$ )

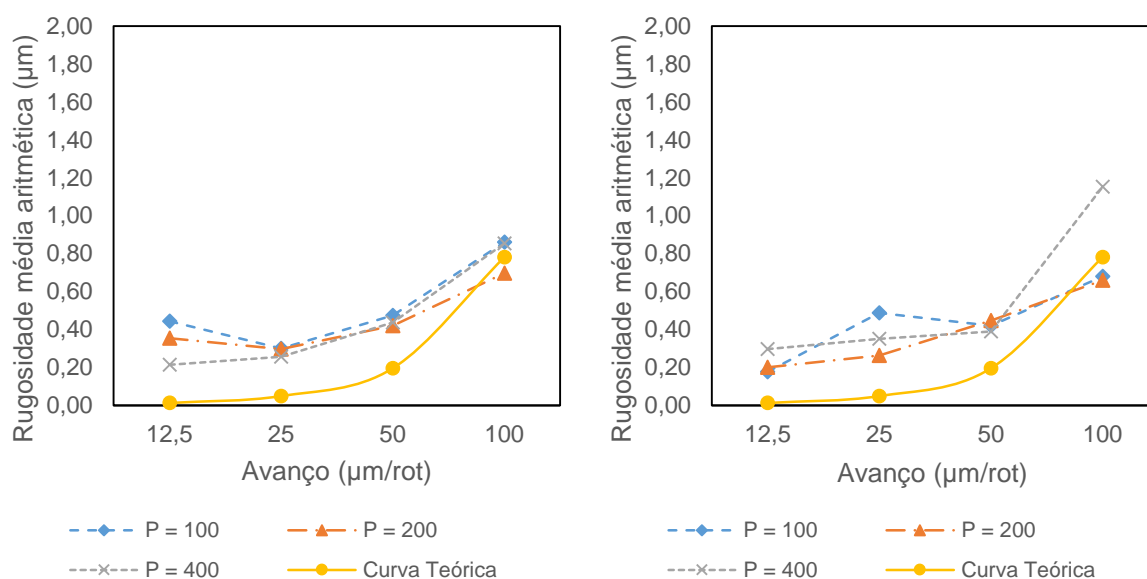
Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Balanço [mm]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]			Rt [ $\mu\text{m}$ ]		
		Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]			Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
		100	200	400	100	200	400
12.5	30	<u>0.18</u>	0.20	0.30	<u>1.61</u>	1.70	2.39
	20	0.44	0.35	0.21	3.71	3.13	2.35
25	30	0.49	0.26	0.35	3.97	1.93	2.37
	20	0.30	0.30	0.26	2.27	2.27	2.18
50	30	0.42	0.45	0.39	2.92	3.31	2.61
	20	0.47	0.42	0.44	3.09	2.67	3.22
100	30	0.68	0.66	1.15	4.43	4.67	8.17
	20	0.86	0.70	0.85	4.99	4.03	5.26

A Figura 4.10 a) mostra a evolução da rugosidade média aritmética do PVC em função do avanço (a) para diferentes profundidades de corte (p) para um comprimento em balanço de 20 mm. Verifica-se que a variação da profundidade de corte não afeta significativamente o valor de Ra, sendo este afetado principalmente pela variação do avanço. As curvas dos valores obtidos possuem um comportamento idêntico ao da curva teórica ( $R_{ta}$ ), obtida através da equação 3.2, apresentando valores mais elevados, dado que na  $R_{ta}$  não são contemplado, por exemplo, os efeitos de vibração da ferramenta e da peça.

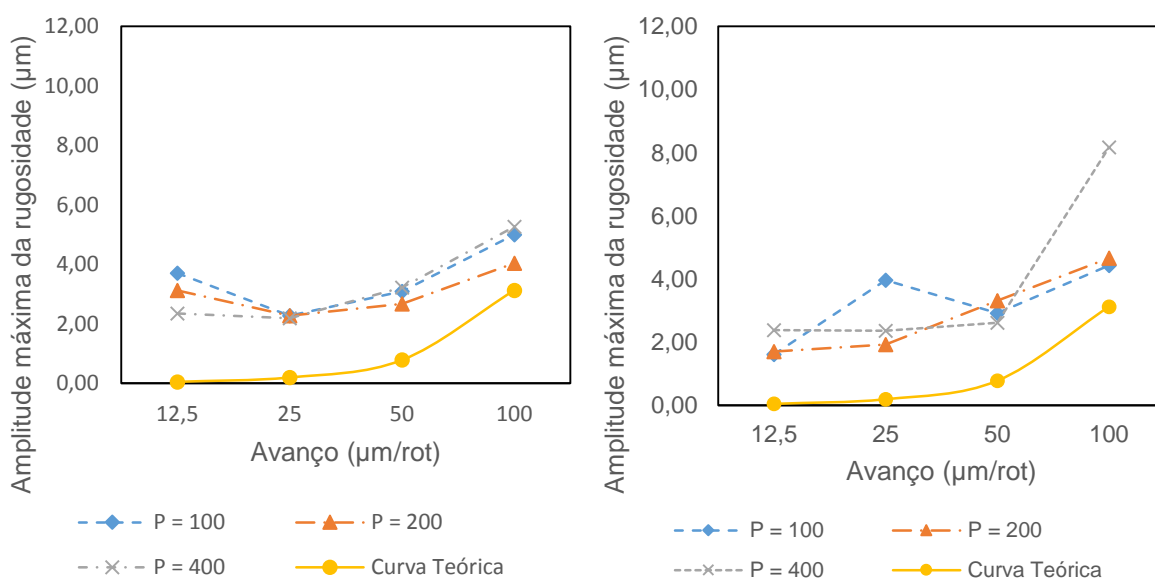
Para um comprimento em balanço de 30 mm - Figura 4.10 b), pode observar-se um comportamento idêntico ao obtido pelo menor comprimento em balanço.

A amplitude máxima da rugosidade (Rt) apresenta um comportamento idêntico a Ra para os respectivos comprimentos em balanço - Figura 4.11.





**a) comprimento em balanço de 20 mm**      **b) comprimento em balanço de 30 mm**  
**Figura 4.10 - Rugosidade média aritmética do PVC em função do avanço e da profundidade de corte**



**a) comprimento em balanço de 20 mm**      **b) comprimento em balanço de 30 mm**  
**Figura 4.11 - Amplitude máxima da rugosidade do PVC em função do avanço e da profundidade de corte**

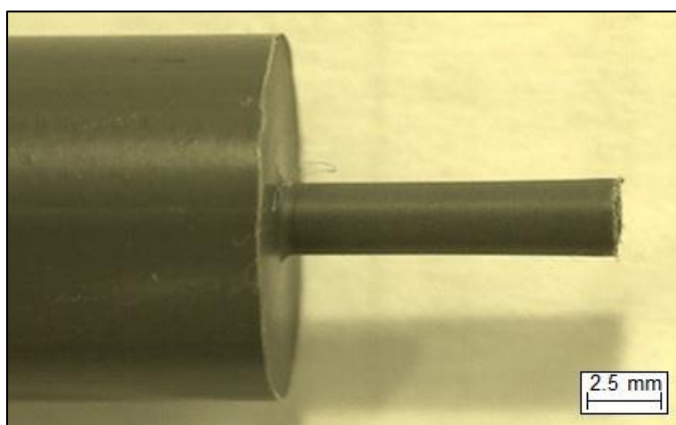
Na Tabela 4.8 encontram-se os fatores utilizados para averiguar a forma dos provetes de PVC nomeadamente o diâmetro médio, o coeficiente de variação do diâmetro e do ângulo, obtidos através da equação 3.5, em função do avanço e da profundidade de corte. Das condições aplicadas, obteve-se o menor coeficiente de variação de diâmetro para o um comprimento em balanço de 20 mm com um avanço de 50 μm/rot e uma profundidade de

corte de 400  $\mu\text{m}$ . No caso do coeficiente de variação do ângulo o melhor valor foi obtido para um comprimento em balanço de 30 mm através de um avanço de 12.5  $\mu\text{m}/\text{rot}$  e uma profundidade de corte de 400  $\mu\text{m}$ .

Tabela 4.8 - Fatores de avaliação da forma obtida nos provetes de PVC ( $v_c = 16 \text{ m/min}$ )

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Balanço [mm]	Diâmetro médio [mm]			$CV_{\text{diâmetro}}$			$CV_{\text{ângulo}}$		
		Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]								
		100	200	400	100	200	400	100	200	400
12.5	30	2.01	2.01	1.98	2.12	2.08	1.78	126.52	39.59	<u>4.5</u>
	20	1.98	1.99	2.02	1.86	2.18	1.5	73.62	50.21	230.84
25	30	1.98	2.02	1.96	2.52	2.72	1.74	79.69	696.74	72.02
	20	2.02	2	2	3.25	2.11	2.08	227.97	729.46	178.32
50	30	2.04	2.02	2.01	3.7	3.34	2.2	74.57	399.2	45.41
	20	2	2.02	1.98	2.38	3.19	<u>1.45</u>	326.9	117.54	249.87
100	30	2.03	2.04	2.02	3.22	4.09	2.64	111.17	84.15	71.88
	20	2.01	2.02	2	3.24	2.64	3.87	40.98	89.85	36.2

Verifica-se a existência de alguma conicidade nas peças produzidas. Na Figura 4.12 pode-se observar um exemplo de uma peça com defeito de forma. O aspecto superficial de todos os provetes pode ser observado em anexo, nas Tabelas B.3 e B.4.



$p=200 \mu\text{m}$   $a=100 \mu\text{m}/\text{rot}$   $b=30 \text{ mm}$   $v_c = 16 \text{ m/min}$

Figura 4.12 - Provette de PVC

## 4.2 Miniaturização

O processo de otimização dos melhores parâmetros de corte passou pela elaboração da equação (4.1) que tem em conta o valor de Ra e Rt bem como o coeficiente de variação do ângulo e do diâmetro. O peso de cada constante foi considerado de 0.4, 0.1, 0.4 e 0.1 para C1, C2, C3 e C4, respetivamente, sendo o somatório das constantes igual a 1. Foi dado igual peso à forma da peça como à rugosidade com o intuito desta não apresentar defeitos de forma evidentes que poderiam limitar a qualidade da peça final. A condição que teve o valor de f igual ou mais próximo a 1, foi considerada a melhor condição para a miniaturização.

$$f = C1 \left(1 - \frac{(CVD - CVDmin)}{CVD}\right) + C2 \left(1 - \frac{(CVA - CVAmin)}{CVA}\right) + C3 \left(1 - \frac{(Ra - Ramin)}{Ra}\right) + C4 \left(1 - \frac{(Rt - Rtmin)}{Rt}\right) \quad (4.1)$$

Os valores da condição f para cada conjunto de parâmetros de corte é apresentado na Tabela 4.9.

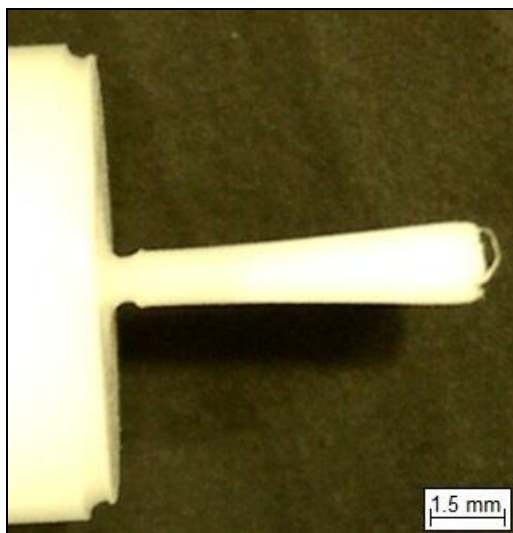
Tabela 4.9 - Valores da avaliação global

Avanço [µm/rot]	Valor da função f								
	PET			POM-C			PVC		
	Profundidade de Corte [µm]								
	100	200	400	100	200	400	100	200	400
12.5	0.653	<b>0.867</b>	0.855	-	0.373	0.515	0.504	0.525	<b>0.781</b>
25	0.515	0.468	0.503	0.591	0.574	<b>0.683</b>	0.501	0.581	0.716
50	0.382	0.350	0.458	0.454	0.501	0.624	0.437	0.415	0.581
100	0.254	0.333	0.457	0.587	0.487	0.210	0.292	0.350	0.268

Assim, os parâmetros otimizados foram profundidade de corte de 200 µm e avanço de 12.5 µm/rot para o PET; profundidade de corte de 400 µm e avanço de 25 µm/rot para o POM-C e profundidade de corte de 400 µm e avanço de 12.5 µm/rot para o PVC.

Tendo em conta estes parâmetros, verificou-se que para diâmetros inferiores a 1.2 mm as peças apresentavam uma conicidade acentuada – Fig 4.13. Como o objetivo era obter peças em microescala, foi delineado que as peças deveriam ter diâmetros inferiores a 1

mm. Com este propósito em vista, o comprimento da pista teve que ser reduzido, maquinando assim 3 pistas com comprimentos de 5, 3 e 2 mm, reduzindo o defeito de forma.



**Figura 4.13 - Exemplo de um provete com elevado defeito de forma obtido na miniaturização**

No caso dos materiais maquinados com uma profundidade de corte de 400  $\mu\text{m}$ , foi alterada a profundidade de corte para 100  $\mu\text{m}$ , com o intuito de se obter o menor diâmetro possível. Foram utilizados avanços de 12.5 e 25  $\mu\text{m}/\text{rot}$  para o PVC e POM-C respectivamente, sendo que, estes apresentam o melhor valor de  $f$  (Eq. 4.1) entre os demais avanços para a menor profundidades de corte.

Para o comprimento de pista de 5 mm, só foi possível obter peças até 1 mm de diâmetro sem que o defeito de forma fosse acentuado. Reduzindo o comprimento de pista para 2 mm, foi possível obter um diâmetro de 0.4 mm no PVC e 0.6 mm no PET e POM-C. Para o comprimento de pista de 3 mm foi possível obter o diâmetro de 0.6 mm no PVC e 0.8 mm no PET e POM-C, sem se verificar defeito de forma significativo.

Na Tabela 4.10 podem ser observados os diâmetros reais obtidos nos diferentes materiais ensaiados, o menor diâmetro só é obtido com algum nível de precisão para o PVC, sendo que no PET não foi possível atingir este diâmetro e no POM-C o diâmetro real ficou distanciado dos 4 mm pretendidos.

Tabela 4.10 - Medidas reais obtidas nos provetes de miniaturização

Material	Medida Teórica [mm]			
	Ø 1	Ø 0.8	Ø 0.6	Ø 0.4
	Medida Real [mm]			
PET	1.042	0.826	0.625	-
POM-C	1.068	0.841	0.689	0.546
PVC	1.018	0.849	0.633	0.421

#### 4.2.2 Estratégia de maquinagem

Tendo em conta que o comprimento de pista a maquinar não poder ser superior a 3 mm, os provetes foram reduzidos inicialmente para um diâmetro de 4 mm e posteriormente maquinados pista a pista. Com esta estratégia de maquinagem foram efetuadas duas peças diferentes, peça A e B, para cada material, como mostra a Figura 4.14. Na peça A, foi maquinado um comprimento de 6 mm em balanço com o menor diâmetro obtido. Por sua vez na peça B, a primeira pista apresenta um comprimento de 2 mm e as restantes 3 mm, onde foi maquinado o menor diâmetro obtido para o respetivo comprimento.

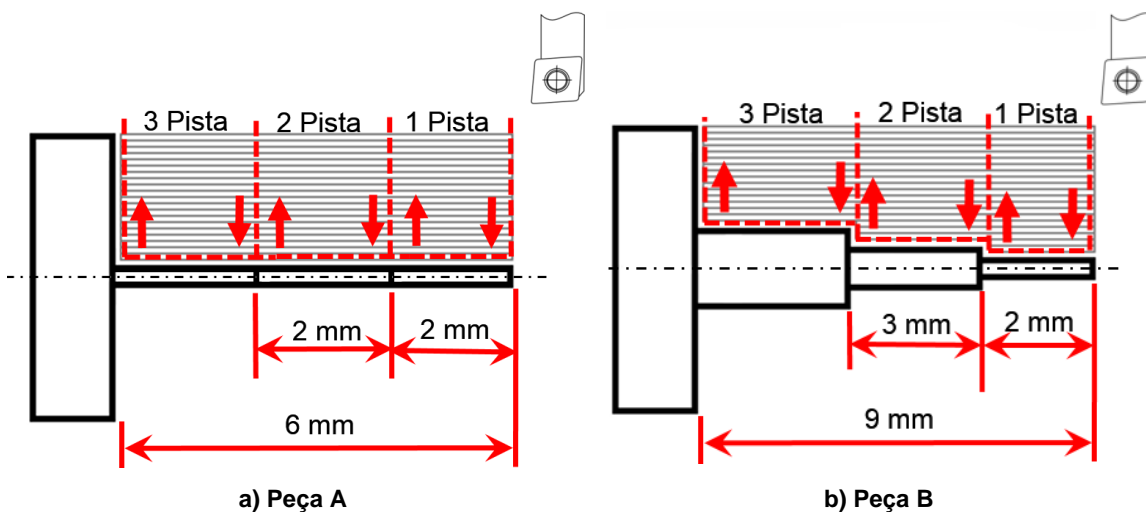


Figura 4.14 - Estratégias de maquinagem

#### 4.2.3 Peças maquinadas

A Figura 4.15 apresenta uma comparação das peças maquinadas com um porta-minas de 0.5 mm de diâmetro, como também, a diferença de forma obtida entre um provete

maquinado com o menor diâmetro possível e um maquinado com um diâmetro 0.2 mm superior, onde se observa uma qualidade superior.

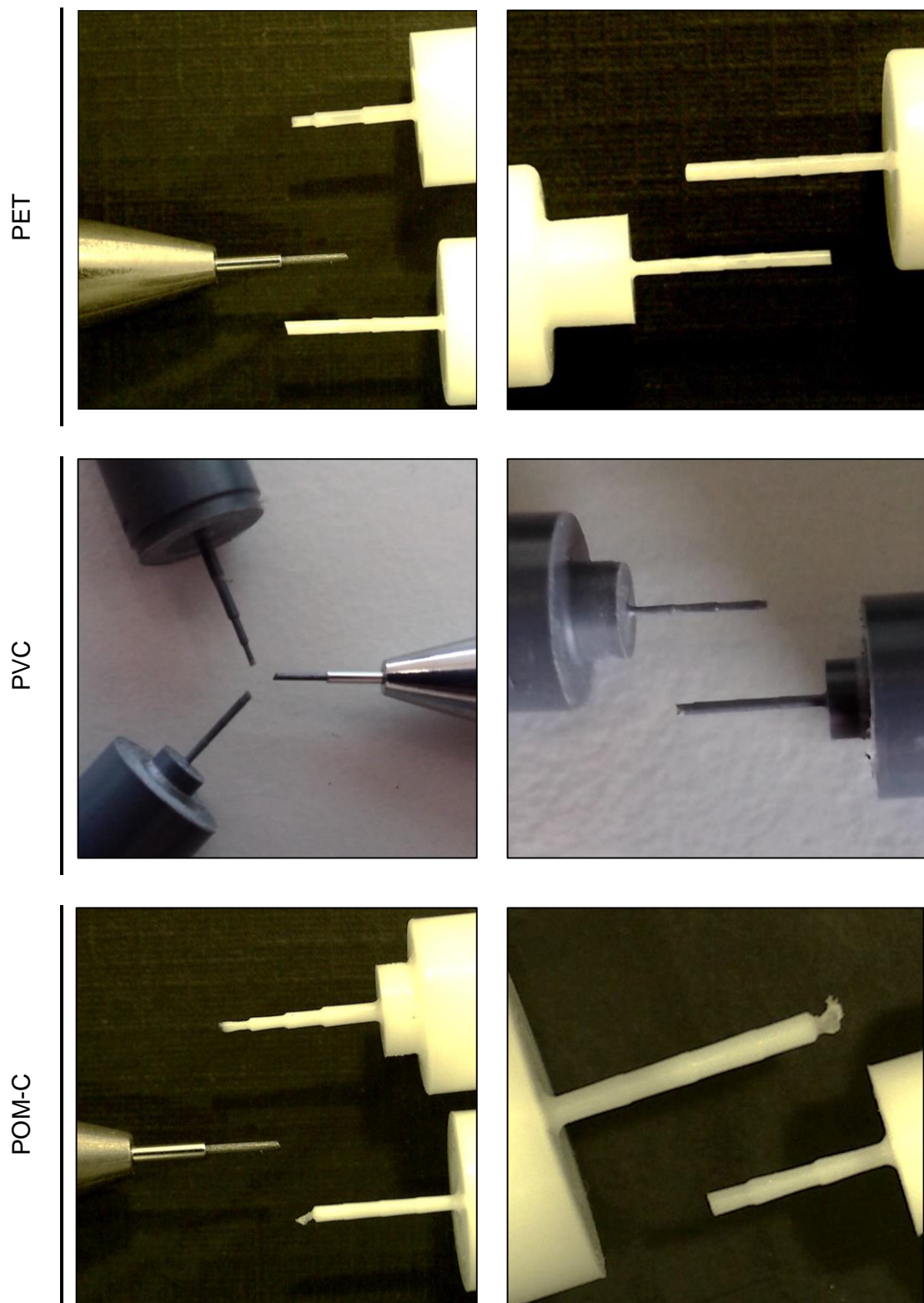


Figura 4.15 - Comparação das peças maquinadas com um porta-minas de 0.5 mm e entre si.

#### 4.2.4 Formas mais complexas

Com o intuito de verificar, se formas mais complexas são possíveis de se efetuar com dimensões reduzidas, foi projetada uma peça modelo com base nos resultados anteriormente obtidos. As dimensões e formato da peça estão representados na Figura 4.16. Estas peças foram maquinadas com a estratégia inicial - Figura 4.17 - com o objetivo de melhorar a qualidade superficial, evitando marcas provocadas pela mudança de pista. Os pontos vermelhos representam o local onde foi verificado o diâmetro real.

As peças de diferentes materiais foram maquinadas com uma profundidade de corte ( $p$ ) de  $100\ \mu\text{m}$  e avanço ( $a$ ) de  $25\ \mu\text{m/rot}$ , visto que, estes parâmetros apresentavam um valor da função  $f$  razoável para quase todos os materiais.

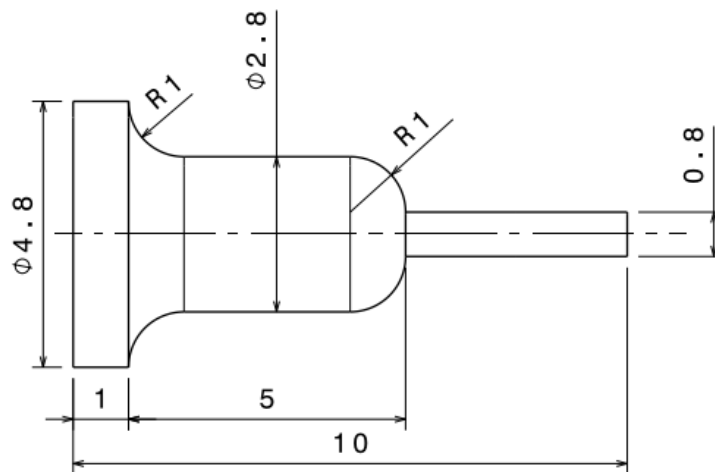


Figura 4.16 - Cotas da micropeça modelo com uma forma mais complexa

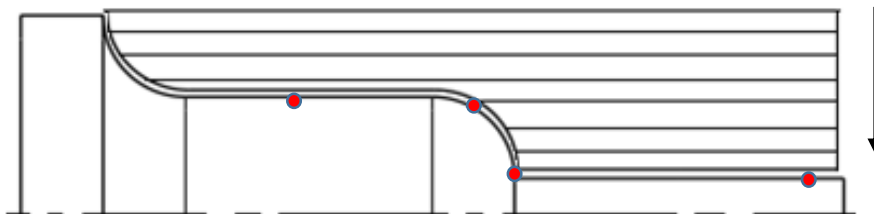


Figura 4.17 - Estratégia de maquinagem

Na Tabela 4.11, é possível observar a precisão e exatidão obtida no torneamento dos materiais ensaiados. Verifica-se que o PVC obteve as medidas com menor desvio do valor teórico, bem como um menor defeito de forma.

Ainda na Tabela 4.11, é possível observar que para o menor diâmetro, esta estratégia de maquinagem apresentou um desvio superior ao obtido nos testes de miniaturização. Deste modo averigua-se que esta estratégia de maquinagem não é a mais indicada para a produção de diâmetros inferiores a 1 mm.

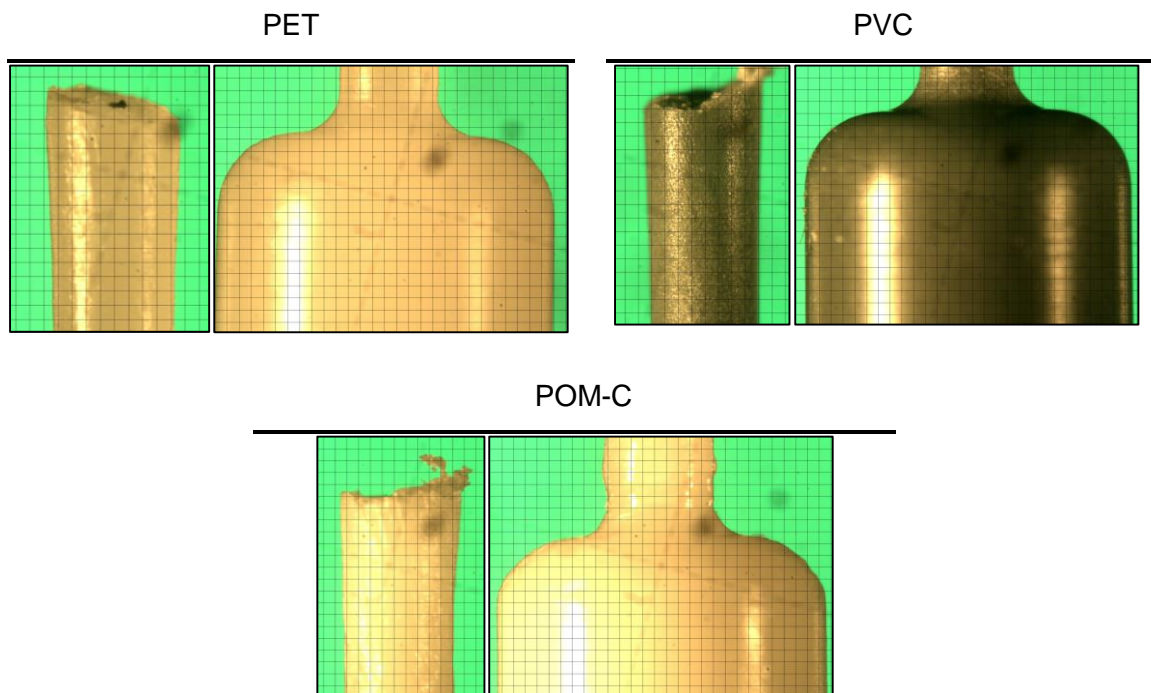
**Tabela 4.11 - Medidas da peça modelo**

Material	Medida Teórica [mm]			
	Ø 2.8	R 1	Ø 0.8	Ø 0.8
	Medida Real [mm]			
PET	2.719	0.702	0.791	0.993
	2.707	0.704	0.787	1.063
	2.714	0.759	0.794	0.921
POM-C	2.722	0.704	0.935	1.009
	2.737	0.699	0.8503	0.945
	2.725	0.668	0.902	0.997
PVC	2.693	0.782	0.771	0.899
	2.682	0.817	0.767	0.822
	2.699	0.880	0.759	0.851

Na Figura 4.18 podem ser observadas as peças com maior pormenor, onde se comprova o melhor acabamento obtido pelo PVC, além de se observar defeitos significativos na superfície do POM-C.

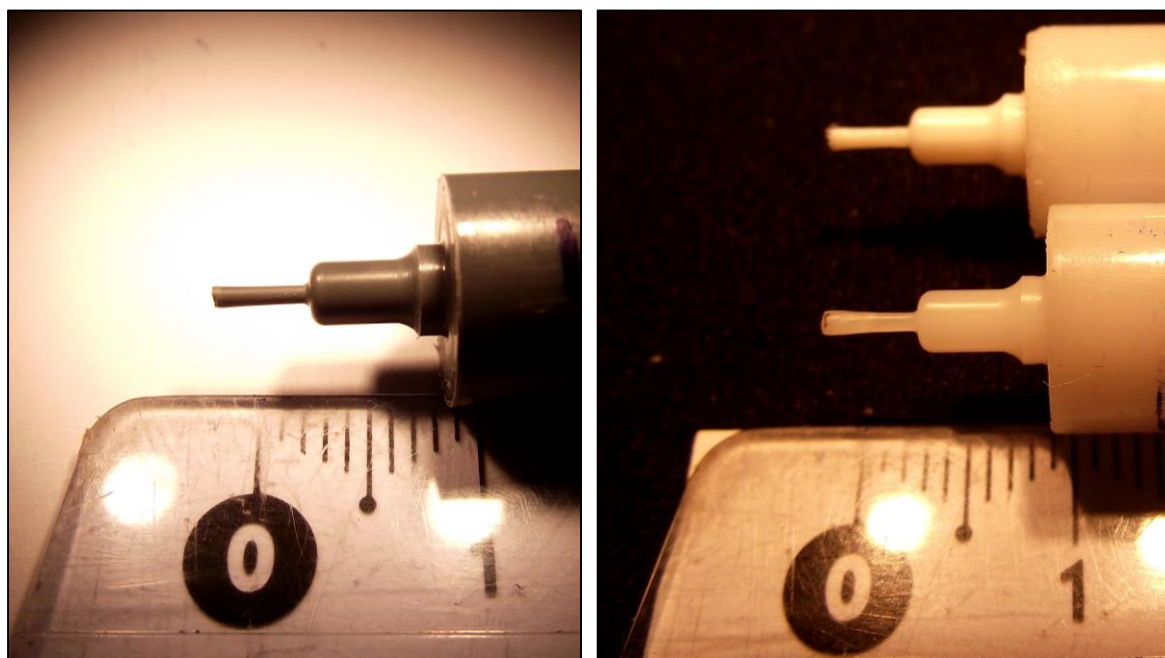
Estes resultados devem estar provavelmente relacionados com o nível de cristalinidade dos materiais, onde o PVC apresenta uma estrutura amorfa e o PET apresenta uma baixa cristalinidade, inferior a 50%, o que lhe garante uma maior rigidez. Xiao and Zhang (2002) afirmam que termoplásticos com uma maior temperatura transição vítrea e resistência mecânica apresentam uma menor rugosidade nas superfícies obtidas após maquinagem.





**Figura 4.18 - Fotografia das peças com uma forma mais complexa**

Na Figura 4.19, podem observar-se os provetes comparados com uma régua para melhor compreensão do tamanho das formas produzidas.



**a) PVC**

**b) POM-C (acima) e PET (embaixo)**

**Figura 4.19 - Peças com forma mais complexa comparadas a uma régua.**

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

### 5.1 Conclusões gerais

Os testes de torneamento foram realizados em PET, POM-C, PVC, HMWPE e UHMWPE usando ferramentas de corte de carbonetos sinterizados (TPGN 16 03 04 H13A).

Numa primeira fase foi avaliado o comportamento dos polímeros perante a maquinagem, verificando a temperatura na ferramenta de corte, o acabamento superficial e o efeito da velocidade de corte na rugosidade.

Na segunda fase foram verificados os melhores parâmetros para a obtenção de uma peça na microescala, bem como a influência do comprimento em balanço.

A última fase do trabalho consistiu na produção de peças com diâmetros reduzidos, tendo por objetivo verificar a capacidade da sua produção em tornos CNC convencionais.

Da realização do trabalho experimental acima sumariado verificou-se que é possível efetuar microtornamento em tornos CNC convencionais, sendo necessário estudar os parâmetros de corte e o material a maquinar antes de proceder ao fabrico das peças. São apresentadas algumas conclusões do trabalho:

- Os materiais mais macios são tendencialmente difíceis de maquinar, dando origem a grandes rugosidades e defeitos de forma - além de, serem suscetíveis ao comprimento em balanço devido à sua baixa resistência à deflexão, provocando vibrações acentuadas na extremidade do provete.
- Não foi verificada uma alteração significativa na temperatura relativamente as condições iniciais. Esta situação ocorre possivelmente devido a baixa velocidade de corte utilizada neste estudo (16 - 50 m/min).
- Verificou-se que os melhores parâmetros para microtornamento dependem do material a maquinar – no entanto, os menores avanços (12.5 e 25  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ) apresentaram, geralmente, melhores resultados. Verificou-se ainda a não relevância do comprimento em balanço na rugosidade.
- Na maquinagem de polímeros é preciso ter em atenção a apra produzida, de forma a evitar o enrolamento da mesma em torno do provete, a fim de evitar danos no acabamento superficial.

- Na miniaturização verificou-se que não era possível utilizar profundidades de corte superiores a 200  $\mu\text{m}$  - a profundidade de 400  $\mu\text{m}$  não permitiu obter diâmetros inferiores a 1.2 mm.
- Verificou-se que é possível obter diâmetros muito pequenos respeitando na generalidade a relação l/d de 5, sendo que o menor diâmetro obtido no PET apresentou uma relação de 3.3.
- Com a diminuição do diâmetro a maquinar, torna-se mais complicado evitar a conicidade.
- Na produção de formas mais complexas, verificou-se que estas geometrias com tamanhos reduzidos apresentam um desvio significativo do valor teórico.
- Dos materiais testados, aquele que evidenciou uma maior propensão para a miniaturização foi o PVC, tendo originado tanto um bom acabamento superficial como um baixo defeito de forma. Este resultado deve-se, provavelmente, ao facto deste apresentar uma estrutura amorfa que lhe garante maior rigidez.

## **5.2 Trabalhos futuros**

Terminada a investigação efetuada no âmbito da micromaquinagem de polímeros, são apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros:

- Realização de ensaios utilizando ferramentas de diferente geometria, bem como ferramentas de PCD.
- Utilização de ar frio, com o intuito de verificar o comportamento dos materiais mais macios quando expostos a este meio durante o corte.
- Medição de forças de corte e de temperaturas de corte, durante a maquinagem, utilizando velocidades de corte mais elevadas.

## 6 REFERÊNCIAS

---

ALAUDDIN, M. *et al.* - Plastics and their machining: A review. **Journal of Materials Processing Technology**. . ISSN 09240136. 54:1 (1995) 40–46. doi: 10.1016/0924-0136(95)01917-0.

AZIZUR RAHMAN, M. *et al.* - CNC microturning: an application to miniaturization. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. . ISSN 08906955. 45:6 (2005) 631–639. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.10.003.

CALLISTER, W. D. - **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro : LTC, 2013. 808 p.

CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. - Investigation of micro-cutting operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. . ISSN 08906955. 46:3-4 (2006) 313–332. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015.

FERRARESI, D. - **Fundamentos da Usinagem dos Metais - Volume 1**. São Paulo : Editora Edgard Blücher, 1970. 800 p.

FETECAU, C. *et al.* - Machining and surface integrity of polymeric materials. **International Journal of Material Forming**. . ISSN 1960-6206. 1:S1 (2008) 515–518. doi: 10.1007/s12289-008-0192-z.

GINDY, N. N. Z. - **Machining characteristics of polymers** [Em linha]. [S.l.] : Aston University, 1978. 339 f. Disponível em WWW:URL:www.lalala.pt.

GRANADO, R. M.; OLIVEIRA, R. A. De; JASINEVICIUS, R. G. - Óptica estrutural de superfícies geradas em polímero óptico (PMMA) através de torneamento com ferramenta de diamante. **Minerva**. 5:1 (2006) 105–110.

GUBBELS, G. - **Diamond turning of glassy polymers**. [S.l.] : Technische Universiteit Eindhoven, 2006. 203 f.

KERESZTES, R. *et al.* - Machinability of engineering polymers. **Sustainable Construction and Design**. 1 (2011) 106–114.

KOBAYASHI, A. - **Machining of plastics**. New York: ed. New York : R.E. Krieger Pub., 1984. 287 p. ISBN 089874007X.

LANEMA - **Catálogo: PolyLanema** [Em linha], atual. 2014. Disponível em WWW:URL:[http://www.lanema.pt/catalogos/Poly\\_Lanema\\_Plasticos\\_Engenharia.pdf](http://www.lanema.pt/catalogos/Poly_Lanema_Plasticos_Engenharia.pdf).

LAPA, V. - **Optimização da maquinagem do PEEK e seus compósitos PEEK/CF30 e PEEK/GF30** [Em linha]. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2008. 251 f. [Consult. 14 mar. 2014]. Disponível em WWW:URL:<https://ria.ua.pt/handle/10773/2557>.

LIU, K.; MELKOTE, S. N. - Effect of plastic side flow on surface roughness in micro-turning process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. . ISSN 08906955. 46:14 (2006) 1778–1785. doi: 10.1016/j.ijmactools.2005.11.014.

MACIEL, D.; LAURO, C.; BRANDÃO, L. - Usinagem de materiais poliméricos utilizando sistema de refrigeração com ar gelado. In **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM**. Campina Grande : ABCM, 2010

MAIO, J. - **Comportamento tribológico de polietilenos** [Em linha]. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2012. 106 f. [Consult. 11 mar. 2014]. Disponível em WWW:URL:<http://ria.ua.pt/handle/10773/10051>.

O. EBEWELE, R. - **Polymer Science and Technology**. [S.l.] : CRC Press, 2000. 483 p.

OLIVEIRA, E. De - **Estudo dos mecanismos governantes do efeito de escala na microusinagem** [Em linha]. [S.l.] : Universidade Estadual Paulista, 2012 [Consult. 13 mar. 2014]. Disponível em WWW:URL:[http://coruja.feis.unesp.br/dem/ppgem/teses\\_dissertacoes/2012/FernandoBrandaodeOliveira\\_final.pdf](http://coruja.feis.unesp.br/dem/ppgem/teses_dissertacoes/2012/FernandoBrandaodeOliveira_final.pdf).

PAULO DAVIM, J. *et al.* - Machinability study on precision turning of PA66 polyamide with and without glass fiber reinforcing. **Materials & Design**. . ISSN 02613069. 30:2 (2009) 228–234. doi: 10.1016/j.matdes.2008.05.003.

PAWADE, K.; BALASUBRAMANIAM, R. - Some Investigations on Surface characteristics in Precision Turning of Nylon and Polypropylene. **Power**. 1 (2012) 240.

QUADRANT - **Machinists Toolkit** [Em linha], atual. 2014. Disponível em WWW:URL:<http://www.quadrantplastics.com/en/home.html>.

RITTER, E.; FARIAS, J. De - Estudo do comportamento da força de corte e da rugosidade no torneamento de compósito de polipropileno com casca de arroz. In **6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Caxias do Sul : ABCM, 2011

SALLES, J.; GONÇALVES, M. - A influência da geometria da ferramenta de corte na qualidade superficial no torneamento do UHMWPE. In **2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Uberlândia : ABCM, 2003

SANDVIK COROMANT - **Ferramenta TPGN 16 03 04 H13A** [Em linha], atual. 2014. a. Disponível em WWW:URL:[http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=TPGN 16 03 04 H13A](http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=TPGN%2016%2003%2004%20H13A).

SANDVIK COROMANT - **Porta-ferramenta CTGPL 2020K 16** [Em linha], atual. 2014. b. Disponível em WWW:URL:[http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=CTGPL 2020K 16](http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=CTGPL%202020K%2016).

SMITH, E. F. - **Single-point Diamond Turning of Amorphous Thermoplastic Polymer**. [S.l.] : North Carolina State University, 1989. 112 f.

XIAO, K. .; ZHANG, L. . - The role of viscous deformation in the machining of polymers. **International Journal of Mechanical Sciences**. . ISSN 00207403. 44:11 (2002) 2317–2336. doi: 10.1016/S0020-7403(02)00178-9.



## ANEXOS

---





## Anexo A: Tabelas de rugosidades

Tabela A.1 - Valores das rugosidades medidas no PET

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Balanço [mm]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]			Rt [ $\mu\text{m}$ ]		
		Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]			Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
		100	200	400	100	200	400
12.5	30	0,59	0,28	0,37	4,04	2,47	3,49
	20	0,51	0,26	0,32	3,19	1,89	2,39
25	30	0,46	0,63	0,76	3,03	3,74	3,99
	20	0,27	0,49	0,48	2,25	2,66	3,17
50	30	0,50	0,48	0,49	3,02	2,49	3,07
	20	0,24	0,27	0,25	1,73	1,77	1,79
100	30	0,55	0,54	0,54	3,05	3,11	3,15
	20	0,48	0,49	0,49	2,94	2,92	2,77

Tabela A.2 - Valores das rugosidades medidas no POM-C

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Balanço [mm]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]			Rt [ $\mu\text{m}$ ]		
		Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]			Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
		100	200	400	100	200	400
12.5	30	0,60	0,54	0,47	5,03	3,63	3,33
	20	0,31	0,37	0,38	2,32	2,70	2,75
25	30	0,52	0,37	0,34	3,39	2,49	2,29
	20	0,56	0,66	0,56	3,21	3,58	3,45
50	30	0,54	0,57	0,56	2,77	3,21	3,17
	20	0,34	0,37	0,38	2,39	3,00	2,91
100	30	0,43	0,43	0,46	3,33	3,26	3,35
	20	0,56	0,55	0,55	3,46	3,11	3,29

Tabela A.3 - Valores das rugosidades medidas no PVC

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Balanço [mm]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]			Rt [ $\mu\text{m}$ ]		
		Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]			Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
		100	200	400	100	200	400
12.5	30	0,33	0,44	0,35	2,59	2,90	2,47
	20	0,29	0,27	0,29	2,11	1,68	1,84
25	30	0,60	0,56	0,27	3,57	2,98	1,72
	20	0,43	0,43	0,41	2,13	2,27	2,20
50	30	0,33	0,29	0,45	2,87	1,91	2,55
	20	0,42	0,43	0,30	2,32	2,18	2,03
100	30	0,41	0,43	0,50	2,37	2,47	3,13
	20	0,50	0,40	0,46	4,18	3,43	3,05

Tabela A.4 - Valores das rugosidades medidas no HMWPE

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Balanço [mm]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]			Rt [ $\mu\text{m}$ ]		
		Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]			Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
		100	200	400	100	200	400
12.5	30	2,18	2,43	2,46	14,16	17,64	15,25
	20	0,75	0,66	0,64	4,87	5,13	4,62
25	30	3,75	3,32	1,72	23,24	20,87	12,33
	20	0,71	0,64	0,73	4,99	4,49	5,21
50	30	2,52	1,64	1,89	21,43	13,27	12,57
	20	0,62	0,62	0,65	4,42	4,29	4,74
100	30	3,73	3,15	2,88	22,17	19,15	17,51
	20	0,68	0,71	0,68	4,79	4,45	4,75

Tabela A.5 - Valores das rugosidades medidas no UHMWPE

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	Balanço [mm]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]			Rt [ $\mu\text{m}$ ]		
		Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]			Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
		100	200	400	100	200	400
12.5	30	-	-	-	-	-	-
	20	1,36	1,50	1,52	7,53	7,85	8,79
25	30	2,43	2,61	2,69	18,10	19,47	18,36
	20	2,74	1,45	1,89	20,79	11,10	14,25
50	30	3,11	2,43	2,26	21,84	18,71	14,23
	20	1,46	1,24	1,51	9,22	8,95	9,02
100	30	2,68	3,14	2,14	19,47	21,42	15,17
	20	2,62	2,03	1,80	22,89	13,96	11,60



## Anexo B: Aspeto dos provetes torneados

Tabela B.1 - Fotografias dos provetes de PET para um comprimento em balanço de 20 mm

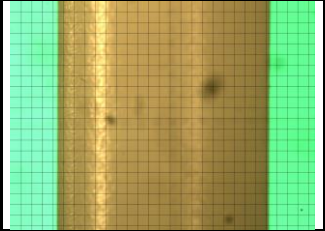
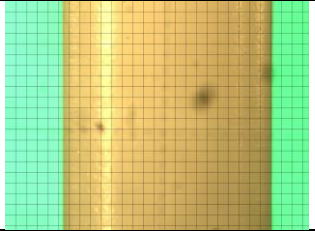
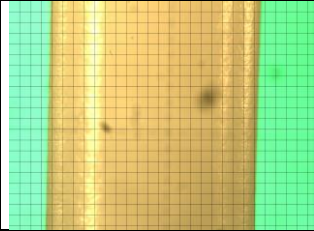
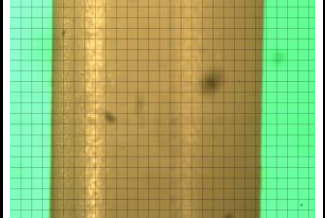
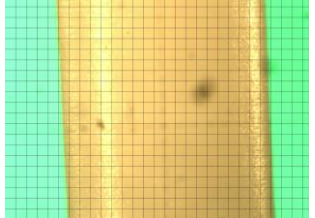
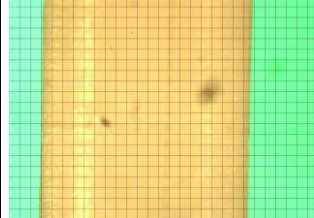
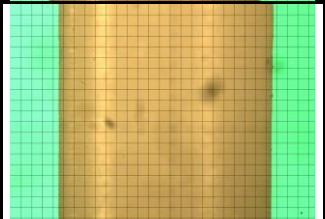
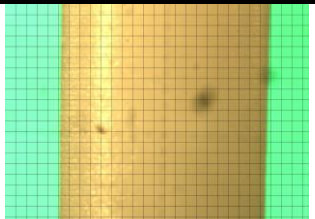
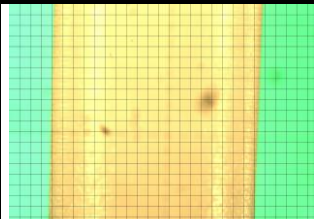
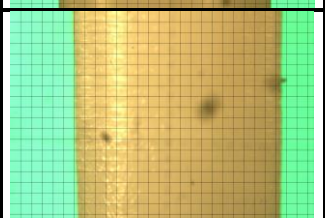
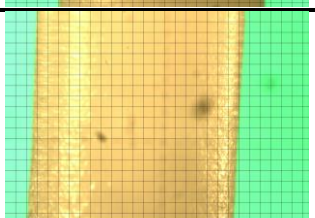
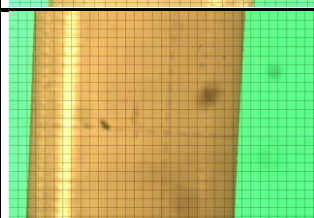
Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	PET 20 mm		
	Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
	100	200	400
12.5			
25			
50			
100			

Tabela B.2 - Fotografias dos provetes de PET para um comprimento em balanço de 30 mm

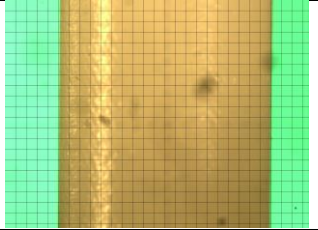
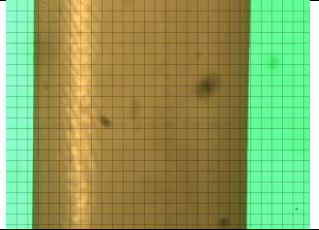
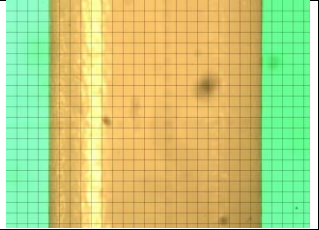
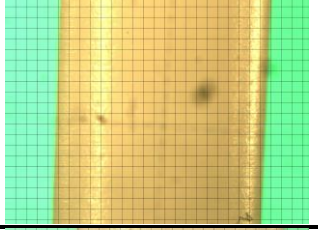
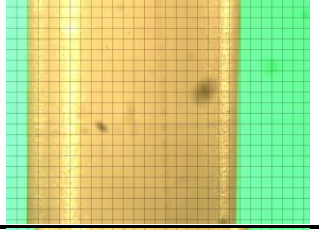
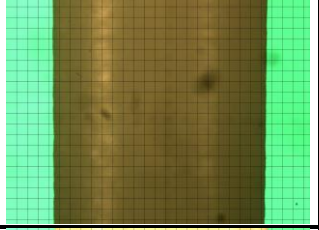
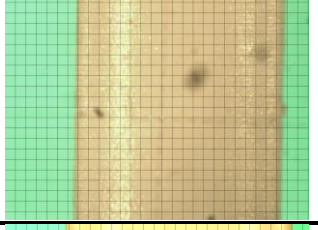
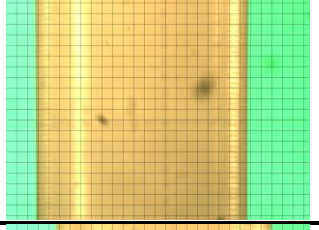
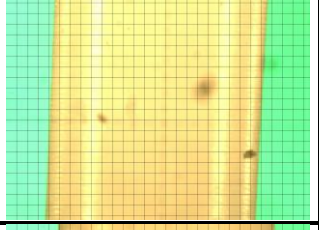
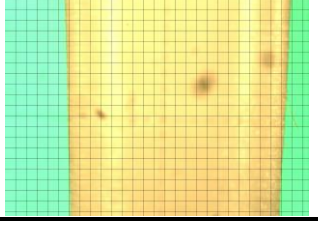
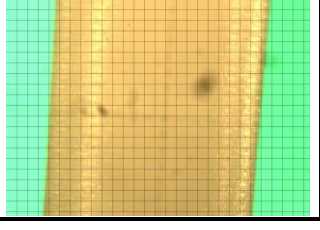
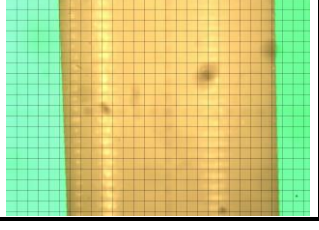
Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	PET 30 mm		
	Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
	100	200	400
12.5			
25			
50			
100			

Tabela B.3 - Fotografias dos provetes de PVC para um comprimento em balanço de 20mm

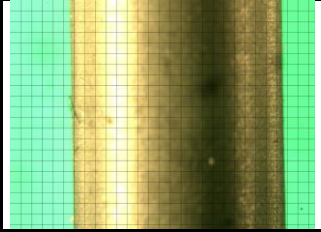
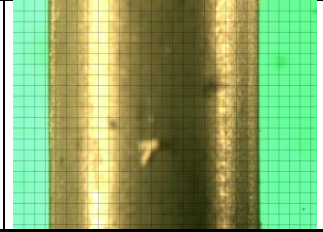
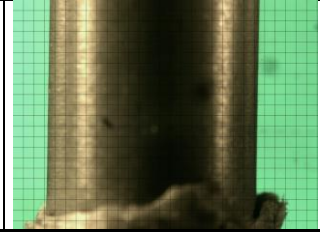
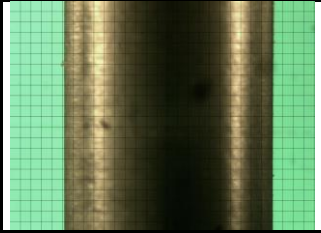
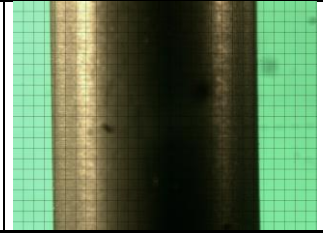
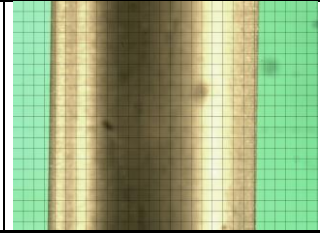
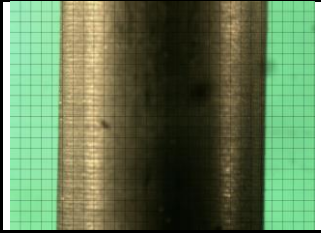
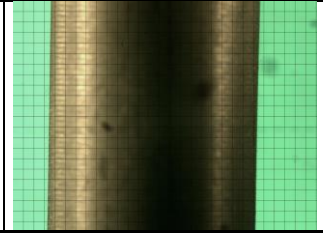
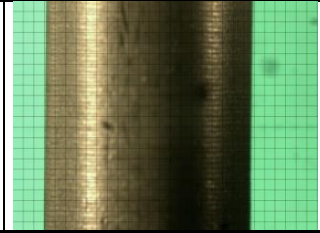
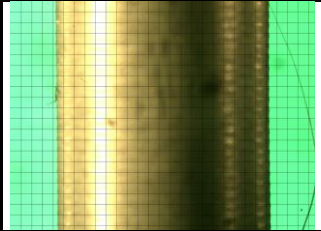
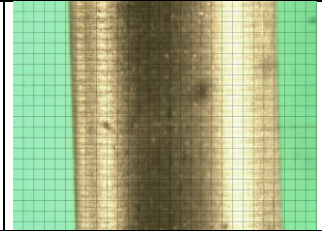
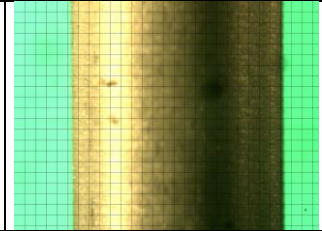
Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	PVC 20 mm		
	Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
	100	200	400
12.5			
25			
50			
100			



Tabela B.4 - Fotografias dos provetes de PVC para um comprimento em balanço de 30 mm

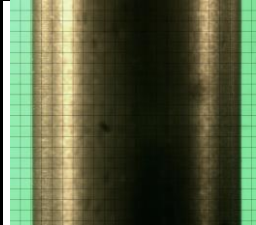
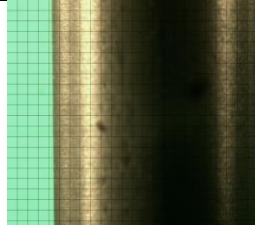
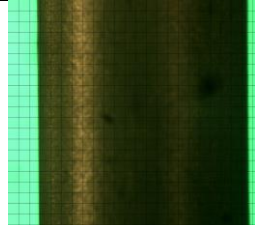
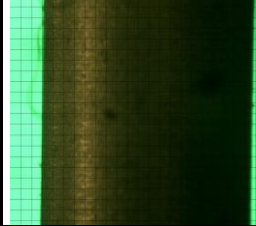
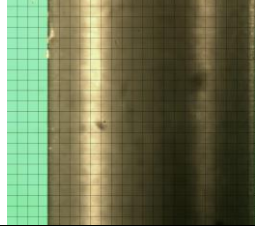
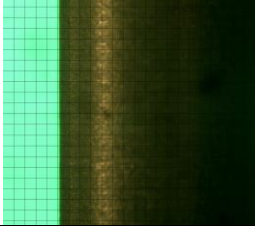
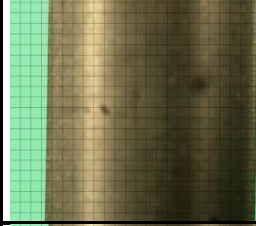
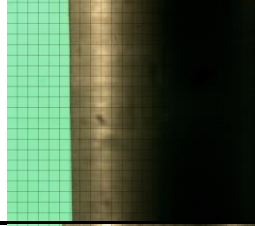

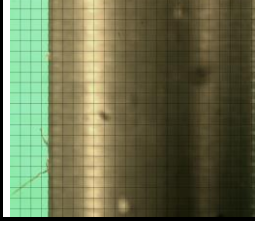
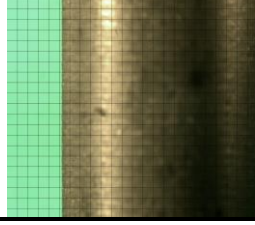
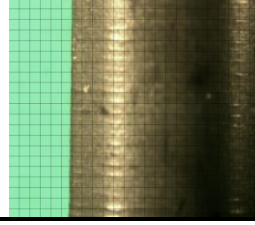
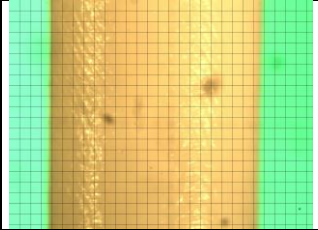
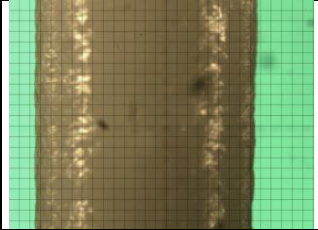
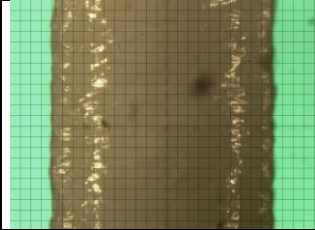
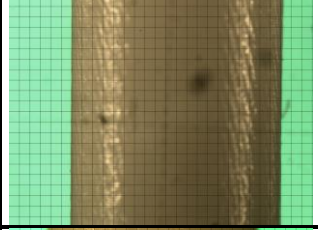
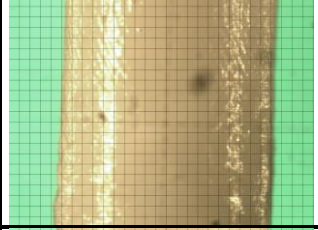
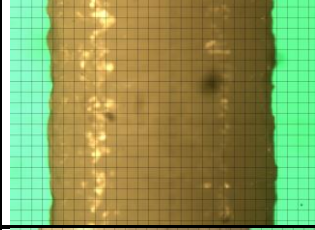
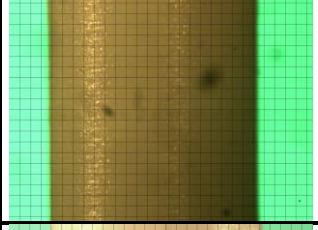
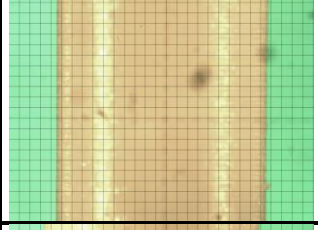

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	PVC 30 mm		
	Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
	100	200	400
12.5			
25			
50			
100			

Tabela B.5 - Fotografias dos provetes de POM-C para um comprimento em balanço de 20 mm

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	POM-C 20 mm		
	Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
	100	200	400
12.5			
25			
50			
100			

Tabela B.6 - Fotografias dos provetes de POM-C para um comprimento em balanço de 30 mm

Avanço [ $\mu\text{m}/\text{rot}$ ]	POM-C 30 mm		
	Profundidade de Corte [ $\mu\text{m}$ ]		
	100	200	400
12.5			
25			
50			
100	