



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2012

**Jorge Augusto
Magano Maio**

Comportamento Tribológico de Polietilenos



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2012

**Jorge Augusto
Magano Maio**

Comportamento Tribológico de Polietilenos

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 Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Auxiliar com agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico todo o esforço, trabalho, dedicação e sacrifício à Tânia Silvestre Almeida, pois será sempre uma excelente referência para a minha vida.

o júri

presidente

Professora Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Aveiro

Professor Doutor José Manuel Ramos Gomes
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade do Minho

Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Professor Doutor João Paulo Davim pela orientação, auxílio e disponibilidade concedidas.

Aos meus colegas Luís Ferreira, João Raposo, José Martins, Jorge Machado, Cátia Matos e Susana Laranjeira pelo apoio, companheirismo e ajuda ao longo do todo o percurso académico.

Aos meus pais, Lénia Borralho e António Maio, um agradecimento muito especial, por todo o apoio, investimento e amparo que me foi concedido ao longo de todos estes anos.

Aos meus irmãos, João e Rafael, por toda a companhia e momentos divertidos, assim como à minha “mana” Ana Rita.

Aos meus avós, por toda a dedicação e carinho.

E a todos os demais que ajudaram a finalizar não só este trabalho, como todo o percurso escolar e académico.

palavras-chave

Atrito; desgaste; tribologia; tribómetro pino sobre disco; polietileno.

resumo

A utilização de materiais poliméricos nas mais diversas aplicações está muito em voga atualmente, pelo que é necessário compreender melhor o comportamento tribológico destes materiais. Sendo o UHMWPE um polietileno com uma crescente importância, nomeadamente na engenharia e na medicina, realizou-se um estudo ao comportamento tribológico deste material, assim como também de outro polietileno, o HMWPE. Numa primeira fase, realizou-se um estudo comparativo do comportamento ao atrito e desgaste do UHMWPE e do HMWPE com outros polímeros (PET, PEEK, POM-C, PVC e PA66). Numa segunda fase estudou-se a influência da pressão de contacto no comportamento tribológico dos polietilenos UHMWPE e HMWPE, seguida de uma terceira fase onde se estudou a influência da velocidade de deslizamento. Na última fase realizou-se um estudo comparativo entre o comportamento tribológico do UHMWPE e do HMWPE em ensaios a seco e ensaios em meio aquoso.

keywords

Friction; wear; tribology; pin-on-disc; polyethylene.

abstract

The use of polymeric materials in various applications are very much in vogue at present day, whereby it is necessary understand the tribological behavior of these materials. As UHMWPE, a polyethylene with a growing importance, particularly in engineering and medicine, was carried out a study to the tribological behavior of this material, as well as other polyethylene, HMWPE. Initially, we carried out a comparative study of friction and wear behavior of UHMWPE and HMWPE with other polymers (PET, PEEK, POM-C, PVC and PA66). A second step was studied the influence of pressure of contact in the tribological behavior of polyethylene's, HMWPE and UHMWPE, followed by a third stage where are studied the influence of the sliding velocity. In the last phase we carried out a comparative study of the tribological behavior of UHMWPE and HMWPE in dry trials and tests in aqueous media.

Índice

1. <i>Introdução</i>	9
1.1. Generalidades	11
1.2. Organização da dissertação.....	15
2. <i>Tribologia de Polietilenos</i>	17
2.1. Introdução	19
2.2. Factores do comportamento entre corpos em contacto em movimento relativo.....	21
2.2.1. Atrito	21
2.2.2. Coeficiente de atrito.....	21
2.2.3. Desgaste	22
2.2.4. Coeficiente de desgaste.....	22
2.2.5. Factores que influenciam o atrito e o desgaste	23
2.3. Polietilenos	24
2.4. Comportamento tribológico dos polietilenos.....	28
2.4.1. Carga.....	30
2.4.2. Velocidade de deslizamento	30
2.4.3. Factor $p v$	31
2.4.4. Temperatura	33
2.4.5. Rugosidade.....	34
2.4.6. Formação do filme.....	35
2.4.7. Lubrificação.....	35
2.5. Síntese.....	36
3. <i>Procedimento Experimental</i>	43
3.1. Materiais ensaiados	45
3.1.1. HMWPE.....	45
3.1.2. UHMWPE	46
3.1.3. PVC.....	46
3.1.4. POM-C	47

3.1.5.	PET.....	48
3.1.6.	PA 66.....	48
3.1.7.	PEEK.....	49
3.1.8.	Propriedades dos materiais utilizados.....	49
3.1.9.	Material antagonista	50
3.1.10.	Geometria dos pinos e dos adaptadores	51
3.2.	Equipamentos utilizados	51
3.2.1.	Tribómetro pino sobre disco.....	51
3.2.2.	Rugosímetro.....	53
3.2.3.	Balança analítica.....	54
3.2.4.	Microscópio Óptico	54
3.3.	Metodologia experimental.....	55
4.	<i>Resultados e sua Discussão</i>	59
4.1.	Desempenho tribológico de cada material	62
4.1.1.	Comparação das superfícies dos discos, após deslizamento	65
4.2.	Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico de polietilenos.....	69
4.2.1.	Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico do HMWPE.....	69
4.2.2.	Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do HMWPE a diferentes pressões de contacto.....	72
4.2.3.	Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico do UHMWPE	73
4.2.4.	Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do UHMWPE a diferentes pressões de contacto.....	76
4.3.	Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico de polietilenos.....	77
4.3.1.	Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico do HMWPE.....	78
4.3.2.	Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do HMWPE a diferentes velocidades de deslizamento	81
4.3.3.	Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico do UHMWPE....	82
4.3.4.	Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do UHMWPE a diferentes velocidades de deslizamento	85
4.4.	Comportamento tribológico de polietilenos em meio aquoso	87
4.4.1.	Estudo do comportamento tribológico do HMWPE em meio aquoso	87

4.4.2.	Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do HMWPE, nos ensaios a seco e em meio aquoso.....	90
4.4.3.	Estudo do comportamento tribológico do UHMWPE em meio aquoso	91
4.4.4.	Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do UHMWPE, nos ensaios a seco e em meio aquoso.....	93
5.	<i>Conclusões</i>	95
	<i>Bibliografia</i>	101
	<i>Anexos</i>	107

Índice de figuras

Figura 1.1 – Exemplos de materiais em polietileno sujeitos a aspetos tribológicos.....	12
Figura 1.2 – Quantidade de artigos científicos publicados nos últimos anos, com estudos realizados na área da tribologia com polietilenos.....	13
Figura 1.3 – Quantidade de artigos científicos publicados nas mais diversas áreas, com estudos realizados na área da tribologia com polietilenos.....	14
Figura 2.1 – Elementos necessários para descrever o sistema tribológico.....	20
Figura 2.2 – Representação esquemática de alguns dos factores relevantes que condicionam o comportamento ao atrito e desgaste de um material.....	23
Figura 2.3 – Representação da formação da cadeia molecular linear do polietileno e um exemplo da ramificação da cadeia molecular do polietileno	25
Figura 2.4 – Exemplo de algumas aplicações dos polietilenos, entre as quais rolamentos de esferas, componentes acetabulares, guias e rodas dentadas.....	27
Figura 2.5 – Definição gráfica do factor Pv (Jamison, 1994).....	32
Figura 3.1 – Imagem dos discos a utilizar nos ensaios.....	51
Figura 3.2 – Imagem demonstrativa da geometria dos pinos e dos adaptadores.....	51
Figura 3.3 – Tribómetro pino sobre disco Plint® TE67/HT.....	52
Figura 3.4 – Imagem da interface do software utilizado para os ensaios tribológicos.....	53
Figura 3.5 – Rugosímetro Hommel Tester T1000 utilizado na medição da rugosidade dos discos e das amostras.....	53
Figura 3.6 – Imagem da balança analítica na qual foi determinada a massa da amostra.....	54
Figura 3.7 – Imagem do microscópio óptico utilizado na observação das superfícies desgastadas dos discos e das amostras.....	55
Figura 3.8 – Imagem da configuração dos ensaios realizados onde é visível o pino de um determinado material (1), o seu suporte (2) e o disco de contraface (3).....	55
Figura 3.9 – Exemplificação do contacto entre o pino e a contraface que cria uma pista de deslizamento, também denominada como filme de transferência (Unal et al., 2004).....	56
Figura 4.1 – Evolução do coeficiente de atrito dos vários polímeros em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.1.....	63
Figura 4.2 – Evolução da temperatura registada à superfície dos discos em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.1.....	63
Figura 4.3 – Coeficiente de desgaste, W, dos vários polímeros para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.1.....	64
Figura 4.4 – Coeficiente de desgaste do PA66, do PET, do PEEK e do UHMWPE para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.1.....	64
Figura 4.5 – Imagens dos discos após ensaios com Pv=1MPa.m/s.....	66
Figura 4.6 – Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios com Pv=1MPa.m/s.....	68
Figura 4.7 – Evolução do coeficiente de atrito, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.....	70
Figura 4.8 – Evolução da temperatura medida no disco, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.....	70
Figura 4.9 – Coeficiente de desgaste para o HMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.....	71
Figura 4.10 – Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE com diferentes pressões de contacto.....	72

Figura 4.11 – Imagens da superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE com diferentes pressões de contacto.....	73
Figura 4.12 – Evolução do coeficiente de atrito, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.....	74
Figura 4.13 – Evolução da temperatura medida no disco, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.....	74
Figura 4.14 – Evolução do bordo de ataque do UHMWPE para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.....	75
Figura 4.15 – Coeficiente de desgaste para o UHMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.....	75
Figura 4.16 – Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do UHMWPE com diferentes pressões de contacto.....	76
Figura 4.17 – Imagens da superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do UHMWPE com diferentes pressões de contacto.....	77
Figura 4.18 – Evolução do coeficiente de atrito, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.6.....	79
Figura 4.19 – Evolução da temperatura medida no disco, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.6.....	79
Figura 4.20 – Coeficiente de desgaste para o HMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.6.....	80
Figura 4.21 – Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE com diferentes velocidades de deslizamento.....	81
Figura 4.22 – Imagens da superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE com diferentes velocidades de deslizamento.....	82
Figura 4.23 – Evolução do coeficiente de atrito, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.7.....	83
Figura 4.24 – Evolução do bordo de ataque do UHMWPE para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.7.....	83
Figura 4.25 – Evolução da temperatura medida no disco, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.7.....	84
Figura 4.26 – Coeficiente de desgaste para o UHMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.7.....	84
Figura 4.27 – Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do UHMWPE com diferentes velocidades de deslizamento.....	86
Figura 4.28 – Imagens da superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do UHMWPE com diferentes velocidades de deslizamento.....	87
Figura 4.29 – Evolução do coeficiente de atrito, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.....	88
Figura 4.30 – Evolução da temperatura medida no disco, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.....	88
Figura 4.31 – Coeficiente de desgaste para o HMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.....	89
Figura 4.32 – Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE para diferentes meios envolventes.....	90
Figura 4.33 – Imagens da superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE para diferentes meios envolventes.....	91
Figura 4.34 – Evolução do coeficiente de atrito, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.....	91
Figura 4.35 – Evolução da temperatura medida no disco, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.....	92

Índice de Figuras

Figura 4.36 – Coeficiente de desgaste para o UHMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.....**92**
Figura 4.37 – Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do UHMWPE para diferentes meios envolventes.....**93**
Figura 4.38 – Imagens da superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do UHMWPE para diferentes meios envolventes.....**94**

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Tabela com algumas propriedades características dos polietilenos.....	26
Tabela 2.2 – Valores P_v utilizados, para vários polietilenos, por diversos autores.....	33
Tabela 2.3 – Ensaio efetuados por diversos autores com polietilenos e respectivos resultados.....	37
Tabela 2.4 – Ensaio efetuados por diversos autores com outros polímeros e respectivos resultados.....	40
Tabela 3.1 – Principais vantagens e aplicações do HMWPE.....	45
Tabela 3.2 – Principais vantagens e aplicações do UHMWPE.....	46
Tabela 3.3 – Principais vantagens e aplicações do PVC.....	47
Tabela 3.4 – Principais vantagens e aplicações do POM-C.....	47
Tabela 3.5 – Principais vantagens e aplicações do PET.....	48
Tabela 3.6 – Principais vantagens e aplicações da PA 66.....	48
Tabela 3.7 – Principais vantagens e aplicações da PEEK.....	49
Tabela 3.8 – Tabela de propriedades físicas e térmicas dos polímeros.....	50
Tabela 3.9 – Tabela das propriedades dos polímeros utilizados.....	50
Tabela 3.10 – Parâmetros de funcionamento do tribómetro Plint® TE67/HT.....	52
Tabela 3.11 – Condições para o primeiro esquema de ensaios efetuados.....	57
Tabela 3.12 – Condições para o segundo esquema de ensaios efetuados.....	57
Tabela 3.13 – Condições para o terceiro esquema de ensaios efetuados.....	58
Tabela 3.14 – Condições para o quarto esquema de ensaios efetuados.....	58
Tabela 4.1 – Condições utilizadas nos ensaios.....	62
Tabela 4.2 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para todos os polímeros em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.1.....	65
Tabela 4.3 – Condições utilizadas nos ensaios.....	69
Tabela 4.4 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o HMWPE em estudo, nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.....	71
Tabela 4.5 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o UHMWPE em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.....	75
Tabela 4.6 – Condições utilizadas nos ensaios para o HMWPE.....	78
Tabela 4.7 – Condições utilizadas nos ensaios para o UHMWPE.....	78
Tabela 4.8 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o HMWPE em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.6.....	80
Tabela 4.9 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o UHMWPE em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.7.....	85
Tabela 4.10 – Condições utilizadas nos ensaios a seco e em meio aquoso para 3500m.....	87
Tabela 4.11 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o HMWPE em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.....	89
Tabela 4.12 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o UHMWPE em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.....	93

Simbologia

Δh – Perda de espessura
 Δm – Perda de massa
 ΔV – Perda de volume
 μ – Coeficiente de atrito
 ρ – Densidade
 \varnothing – Diâmetro
 A – Área aparente de contacto
 F_a – Força de atrito
 F_N – Força normal
HR – Humidade relativa
 L – Distância de deslizamento
 P – Pressão de contacto
 Pv – Produto da pressão aparente de contacto e velocidade de deslizamento
 R_a – Rugosidade média aritmética
 T – Temperatura
 T_f – Temperatura no final do ensaio
 V – Velocidade de deslizamento
 W – Coeficiente de desgaste

Abreviaturas

AISI – American Iron and Steel Institute
ASTM – American Society of Testing and Materials
HDPE – Polietileno de alta densidade
HMWPE – Polietileno de alto peso molecular
IEC – International Electrotechnical Commission
ISO – International Organization for Standardization
MO – Microscópio óptico
OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PA – Poliamida
PE – Polietileno
PEEK – Poli-éter-éter-cetona
PET – Politereftalato de etileno
POM – Polioximetileno
PVC – Policloreto de vinil
UHMWPE – Polietileno de ultra alto peso molecular

Capítulo 1.

1. Introdução

Introdução

1.1. Generalidades

A ciência multidisciplinar da interação entre superfícies em movimento relativo é, atualmente, identificada como tribologia. Esta interação promove fenómenos entre duas superfícies em contacto que surgem devido à geração e transmissão de forças, levando a fenómenos como o atrito e o desgaste, sendo que a lubrificação é o meio vulgarmente utilizado para reduzir ambos os fenómenos indicados sobre as superfícies em contacto (Fahim & Davim, 2010). Por outras palavras, a tribologia pode ser definida como a ciência que se foca no atrito, desgaste e lubrificação de superfícies em interação com movimento relativo (Stachowiak & Batchelor, 2005).

O desgaste, o atrito e a lubrificação têm um tremendo impacto em muitos aspetos do dia-a-dia, desde o desgaste dos dentes de engrenagens ao projeto de rolamentos de alta velocidade para vaivéns espaciais. O atrito pode definir-se como a resistência ao movimento de um corpo sobre outro corpo. O desgaste como a perda de massa de um ou mais corpos provocado pelo movimento relativo entre eles. E a lubrificação pode ser um sólido, um líquido ou um gás adicionado entre dois corpos em contacto deslizante para reduzir o atrito e o desgaste (Blau, 1992). A importância destes factores é visível nos problemas relacionados com o atrito e o desgaste, pois estes são uma das maiores causas de desperdício energético e económico a nível industrial (Stachowiak & Batchelor, 2005).

Segundo Neale (1995), a performance tribológica dos materiais tem uma contribuição muito elevada na confiabilidade e eficiência de todas as máquinas. Assiste-se, assim, à necessidade de um desenvolvimento e estudo de materiais e soluções mais eficazes e capazes de responder aos desafios atuais, sempre em constante crescimento e evolução. Neste contexto, surgem os materiais poliméricos e o seu crescente e, cada vez, maior interesse por parte de investigadores, cientistas, académicos e indústria em geral. Os polímeros ganharam ênfase devido à sua baixa densidade, fácil processamento, baixo coeficiente de atrito e desgaste (em alguns casos) e ainda, pelo facto de não necessitarem de lubrificação (Feyzullahoglu & Saffak, 2008; Unal & Mimaroglu, 2003).

Comportamento Tribológico de Polietilenos

Dentro do grupo dos polímeros nem todos são interessantes ao nível tribológico, pelo que os utilizados em aplicações mais comuns e/ou tradicionais são os polietilenos (entre vários o HDPE, polietileno de alta densidade, e o UHMWPE, polietileno de ultra alto peso molecular), os poliacetais ou POM's (polioximetileno), os PET's (politereftalato de etileno), as poliamidas (PA), os PEEK's e os PVC's (policloreto de vinil).

O polietileno é quimicamente o polímero mais simples, sendo ainda um polímero termoplástico de elevada massa molecular pelo que tem como vantagem a sua versatilidade e facilidade de utilização (Gnauck & Fründt, 1991). Os polietilenos são polímeros parcialmente cristalinos, flexíveis, inertes e não tóxicos que, dependendo da sua ramificação da cadeia linear, podem formar tipos diferentes de polietilenos, sendo que cada ramificação tem as suas próprias propriedades características (Coutinho et al., 2003). Estes polietilenos são de grande interesse em engenharia sendo que são muito bem aceites nas indústrias aeronáutica, automóvel, eletrónica e química (Lucas et al., 2011). A produção mundial de materiais em polietileno centra-se tanto em materiais mais sujeitos a aspetos tribológicos (atrito e desgaste, entre outros), assim como também, em materiais que estão pouco sujeitos a aspetos tribológicos. Como exemplo de materiais pouco sujeitos a aspetos tribológicos temos, componentes para saneamento, telecomunicações, depósitos e embalagens. Na figura 1.1 mostra exemplos de alguns materiais em polietileno mais sujeitos a aspetos tribológicos, pois são esses que são interessantes estudar.

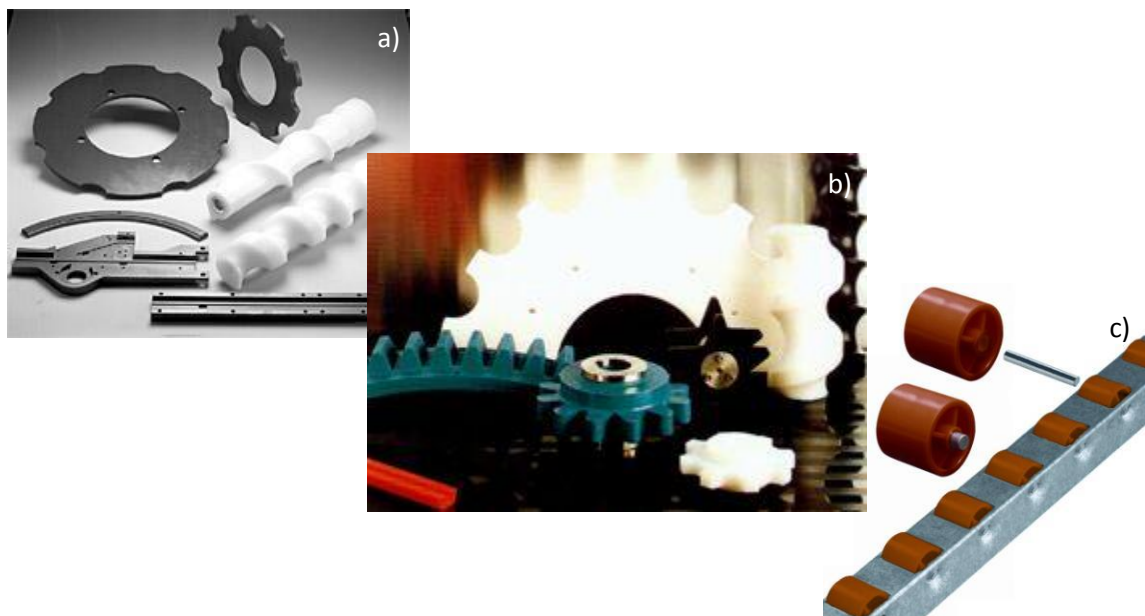


Figura 1.1 – Exemplos de materiais em polietileno sujeitos a aspetos tribológicos.¹

¹ Adaptação:

<http://egpjoinville.wordpress.com/2010/02/14/uhmw-pe/>

<http://www.stalgesunrise.com.br/conteudo/item/plsticos-de-engenharia>

<http://www.florak.com/flotrak.html>

Comportamento Tribológico de Polietilenos

Com a aplicação de polímeros para fins tribológicos aumentando e estendendo-se ainda mais em novas áreas, muito devido à crescente exigência por materiais de alto desempenho, de baixo custo e mais fáceis de maquinar, entre outros factores, leva a que os materiais poliméricos ganhem espaço e se desenvolvam constantemente. Cada vez mais, os polímeros conseguem substituir outros materiais, devido às suas propriedades, pois permitem projetar peças de maior complexidade melhorando a aparência, reduzir o seu peso e custo, melhorar o acabamento pois a peça pode sair pronta do molde eliminando a necessidade de operações secundárias e melhor resistência química e à corrosão quando o material é escolhido corretamente.

Muitas pesquisas têm sido realizadas sobre a tribologia de polímeros e sua aplicação em várias indústrias. A caracterização ao desgaste de materiais poliméricos é atualmente um tópico de grande interesse dada a aplicação crescente de soluções inovadoras em termos de materiais na indústria. A figura 1.2 mostra o crescente aumento de artigos publicados envolvendo estudos tribológicos com polietilenos nos últimos anos e a figura 1.3 mostra, não só a diversidade de áreas de estudo sobre polietilenos, como mostra que a medicina já ultrapassou a engenharia muito devido às propriedades do UHMWPE em aplicações médicas.

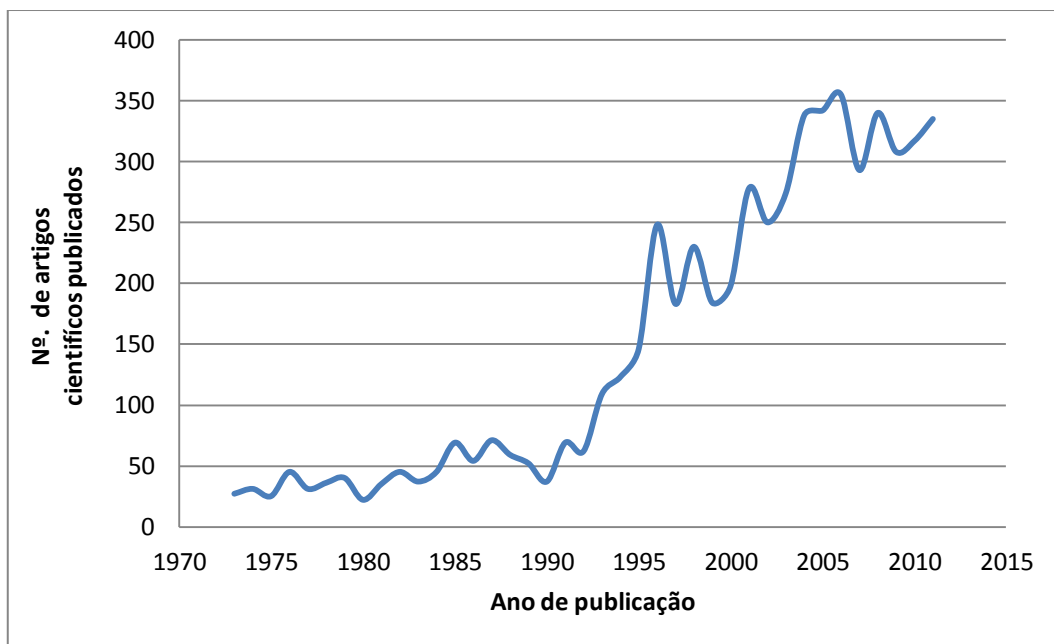


Figura 1.2 – Quantidade de artigos científicos publicados nos últimos anos, com estudos realizados na área da tribologia com polietilenos.²

² Adaptação: www.scopus.com/home.url

Palavra chave: polyethylene and wear

Data: Fevereiro 2012

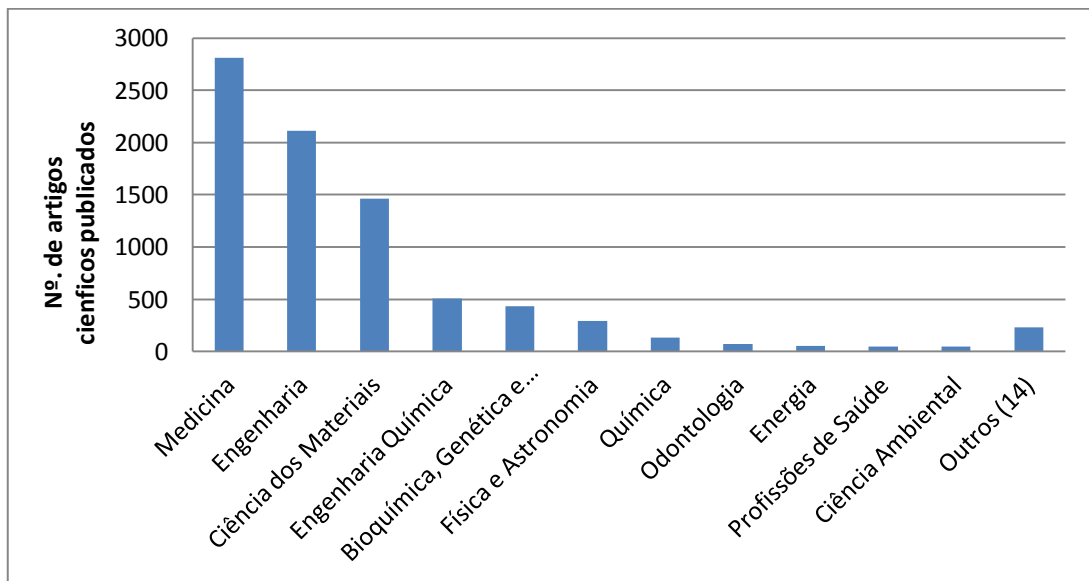


Figura 1.3 – Quantidade de artigos científicos publicados nas mais diversas áreas, com estudos realizados na área da tribologia com polietilenos.³

Pretende-se com este trabalho, um estudo comparativo do comportamento ao atrito e desgaste de diversos tipos de polímeros, com especial ênfase em polietilenos, tendo como antagonista o aço de construção. Também será realizado um estudo mais intensivo sobre polietilenos, onde se dará importância à influência da pressão de contacto e da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico dos polietilenos, assim como será feito o estudo do comportamento tribológico dos polietilenos em meio lubrificado. Por fim, será feita uma análise às superfícies dos discos, assim como às superfícies das amostras em estudo. O trabalho experimental foi executado numa máquina de ensaios pino sobre disco. Os polímeros a serem ensaiados são o polioximetileno (POM-C), o politereftalato de etileno (PET), o PVC (policloreto de vinil), a poliamida (PA66), o PEEK (poli-éter-éter-cetona) e dois polietilenos, o UHMWPE, polietileno de ultra alto peso molecular e o HMWPE, polietileno de alto peso molecular, que apresenta propriedades físicas e mecânicas semelhantes ao HDPE (polietileno de alta densidade) mas com peso molecular inferior ao UHMWPE.

³ Adaptação: www.scopus.com/home.url

Palavra chave: polyethylene and wear

Data: Fevereiro 2012

1.2. Organização da dissertação

A presente dissertação foi organizada de acordo com a estrutura que se apresenta de seguida:

- ✓ No **Capítulo 1 (Introdução)** é feita uma breve introdução ao tema e é feita a apresentação da investigação realizada;
- ✓ No **Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica)** é feita uma breve apresentação da tribologia, e aos conceitos e factores que influenciam o comportamento tribológico. Também são apresentados os aspetos mais relevantes dos polímeros, e em especial dos polietilenos, assim como os principais factores de influência no seu comportamento tribológico entre corpos em contacto deslizante. É ainda apresentada uma síntese de vários estudos realizados no campo da tribologia dos polietilenos;
- ✓ No **Capítulo 3 (Procedimento Experimental)** é feita uma caracterização e apresentação dos equipamentos utilizados assim como dos materiais em estudo. É apresentado ainda o procedimento e planeamento experimental efetuado assim como as condições utilizadas nos ensaios;
- ✓ No **Capítulo 4 (Resultados e Discussão)** são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios. Estes resultados encontram-se divididos em diversas secções ordenadas consoante os objetivos propostos. Estes são:
 - Comparar o comportamento tribológico dos polietilenos, HMWPE e UHMWPE, com outros polímeros, PVC, POM-C, PET, PA66 e PEEK.
 - Estudar a influência da pressão de contacto no comportamento tribológico dos polietilenos.
 - Estudar a influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico dos polietilenos.
 - Estudar o comportamento tribológico dos polietilenos em meio aquoso.
 - Analisar as superfícies de desgaste dos discos e das amostras.
- ✓ No **Capítulo 5 (Conclusões)** são apresentadas as conclusões mais importantes retiradas dos ensaios realizados.

Capítulo 2.

2. Tribología de Polietilenos

Tribologia de polietilenos

2.1. Introdução

A tribologia deriva da palavra grega “tribos” que significa atrito. O interesse em tribologia, a sua aplicação na prática e nas suas partes constituintes é muito antiga, contudo o termo tribológico é relativamente recente (Dowson, 1998). A antiguidade dos problemas tribológicos remonta ao período Paleolítico, onde os exercícios feitos para fazer furos ou produzir fogo indiciam que foram usados equipamentos feitos de chifres, ossos ou pedras e existindo também indícios que tinham, claramente, a existência de algum tipo de rolamentos para, por exemplo, moer cereais. Apenas em 1966, após a publicação do relatório de Jost é que o termo “Tribologia” começou a ser utilizado frequentemente (Bhushan, 1999; Persson, 1999).

O glossário publicado em 1969 sobre tribologia, pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) define o termo como – “a ciência e a tecnologia que se ocupa do contacto entre corpos em movimento relativo e de tudo o que lhes diz respeito”, ou de acordo com a versão original “The science and technology of interacting surfaces in relative motion and of the practices related thereto”.

De acordo com Stachowiak & Batchelor (2005) o desgaste é a maior causa de desperdício e perda de desempenho mecânico. Assim, qualquer redução no desgaste pode resultar em consideráveis poupanças. Já o atrito é a principal causa de desgaste e dissipação de energia. É estimado que um terço dos recursos energéticos mundiais, no presente, precisam de superar o atrito, de uma ou outra forma, na sua produção. A lubrificação é um meio efetivo de controlar e reduzir o atrito e o desgaste. Daqui se pode compreender a importância da tribologia e do seu estudo no mundo atual, tanto a nível económico como a nível científico.

São inúmeros os factores que condicionam o comportamento tribológico dos materiais e são numerosos os seus efeitos. O esquema seguinte representa, de uma forma não exaustiva, uns e outros (Magalhães & Baptista, 1983).

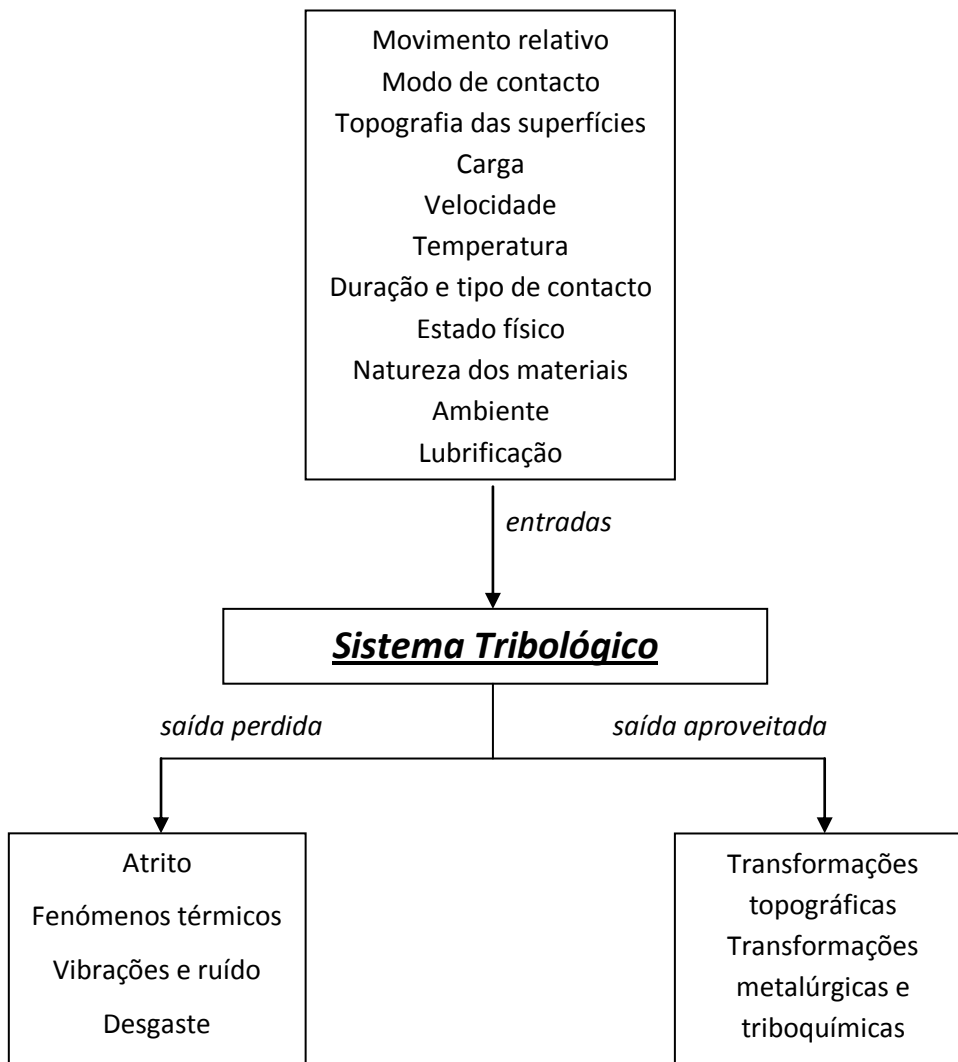


Figura 2.1 – Elementos necessários para descrever o sistema tribológico.

O projeto de sistemas tribológicos é complexo. Os valores de referência de atrito e desgaste são meramente indicativos, mediante condições particulares. Os mais variados materiais, como metais, cerâmicas, polímeros e compósitos têm sido usados tradicionalmente em aplicações tribológicas como material anti-atrito, isto é, baixo coeficiente de desgaste e coeficiente de atrito, tais como engrenagens, rolamentos, articulações artificiais, ou então como materiais de atrito com baixo desgaste e atrito moderadamente alto, como em pneus, discos de embraiagem e pastilhas de freios (Fahim & Davim, 2010). Segundo os mesmos autores citados o atrito e o desgaste não são propriedades inertes aos materiais mas dependem em grande parte das condições de funcionamento, das configurações do teste e seus parâmetros. Assim a tribo-eficiência dos materiais é definida pelo atrito e desgaste desejado a que um material proporciona um desempenho nos limites operacionais de alta pressão-velocidade (Pv) e temperaturas elevadas.

2.2. Factores do comportamento entre corpos em contacto em movimento relativo

2.2.1. Atrito

O atrito faz parte do nosso quotidiano e tem sido estudado intensivamente ao longo de centenas de anos. Este fenómeno consiste na resistência ao movimento relativo entre dois corpos em contacto. O atrito tem grande interesse teórico e prático e envolve a física fundamental, uma vez que, é o suporte da maioria dos movimentos. E também porque consome uma parte da energia produzida nos processos dinâmicos (Myshkin et al., 2006; Persson, 1999).

De acordo com Zambelli & Vincent (1998) *G. Amontons*, em 1699, apresentou as duas principais leis do atrito que, mais tarde, em 1785, *C. A. Coulomb* confirmou, estabelecendo ainda uma terceira lei.

- A força de atrito é proporcional à força normal aplicada ao contacto;
- A força de atrito é independente da área aparente de contacto;
- O atrito dinâmico é independente da velocidade de deslizamento (mas apenas para situações particulares de velocidades baixas ou muito baixas).

2.2.2. Coeficiente de atrito

Para caracterizar o atrito entre dois corpos em movimento relativo é utilizado o coeficiente de atrito. Segundo a primeira lei do atrito, a força de atrito é dada pela seguinte equação:

$$F_a = \mu \cdot F_N \quad [\text{N}] \quad (1.1)$$

logo, o coeficiente de atrito é:

$$\mu = \frac{F_a}{F_N} \quad (1.2)$$

sendo que, μ é o coeficiente de atrito, F_a é a força de atrito e F_N é a força normal.

O coeficiente de atrito não é uma propriedade do material. É uma constante adimensional, válida apenas para um determinado par de materiais e para um determinado conjunto de condições de contacto (Bhushan, 1999; Zambelli & Vincent, 1998).

2.2.3. Desgaste

Apesar de ser um fenómeno muito frequente, o desgaste tem mais que uma definição e cada uma delas varia consoante a literatura. Segundo a “American Society for Testing and Materials” (ASTM, 2007) o desgaste é um dano causado a uma superfície sólida, que geralmente envolve uma perda progressiva de material devido ao movimento entre a própria superfície e um ou mais corpos em contacto. Já, de acordo com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE, 1969) o desgaste é classificado como a perda progressiva de material a partir da superfície operante de um corpo ocorrendo como resultado de um movimento relativo na superfície.

O desgaste é um objeto de estudo muito importante pois as suas perdas económicas associadas são críticas. Existem diversos mecanismos de desgaste e pelo meio de ensaios experimentais é possível quantificar a perda de material que ocorre por desgaste. Assim é possível controlar e minimizar este fenómeno.

A abrasão, a erosão, a adesão, a fadiga superficial e o desgaste triboquímico são os mecanismos de desgaste mais presentes na tribologia sendo que na tribologia de polímeros os mecanismos mais comuns são a abrasão e a adesão, que pode dar origem à formação de uma película de filme reduzindo o efeito destes (Stachowiak & Batchelor, 2005).

2.2.4. Coeficiente de desgaste

O coeficiente de desgaste é, geralmente, determinado para as condições de atrito em regime estável, obtido após sucessivas passagens pela pista de deslizamento. Os parâmetros daí resultantes são frequentemente utilizados para descrever o comportamento do sistema tribológico (Viswanath & Bellow, 1995).

Vejamos, então, algumas das equações habitualmente utilizadas e descritas na literatura (Zambelli & Vincent, 1998).

O coeficiente de desgaste é dado pela equação:

$$W = \frac{\Delta m}{\rho \cdot A \cdot L} = \frac{\Delta h}{L} \quad (1.3)$$

sendo, W o coeficiente de desgaste (adimensional), Δm a perda de massa, ρ a densidade do material, A a área aparente de contacto, Δh a perda de espessura do provete e L a distância de deslizamento.

O coeficiente de desgaste específico é obtido pela equação:

$$W_s = \frac{\Delta V}{F_N \cdot L} \left[\frac{mm^3}{N.m} \right] \quad (1.4)$$

sendo, W_s o coeficiente de desgaste específico, ΔV o volume de desgaste, L a distância de deslizamento e F_N a carga normal aplicada.

2.2.5. Factores que influenciam o atrito e o desgaste

São diversos os factores que influenciam o atrito e o desgaste, nomeadamente o coeficiente de atrito e a resistência ao desgaste que não dependem apenas do material em contacto, mas também das condições do sistema tribológico e das propriedades do material antagonista. Esses factores podem ser divididos em vários grupos, conforme está representado na figura 2.2 (Czichos et al., 1995; Friedrich & Schlarb, 2008; Viswanath & Bellow, 1995).

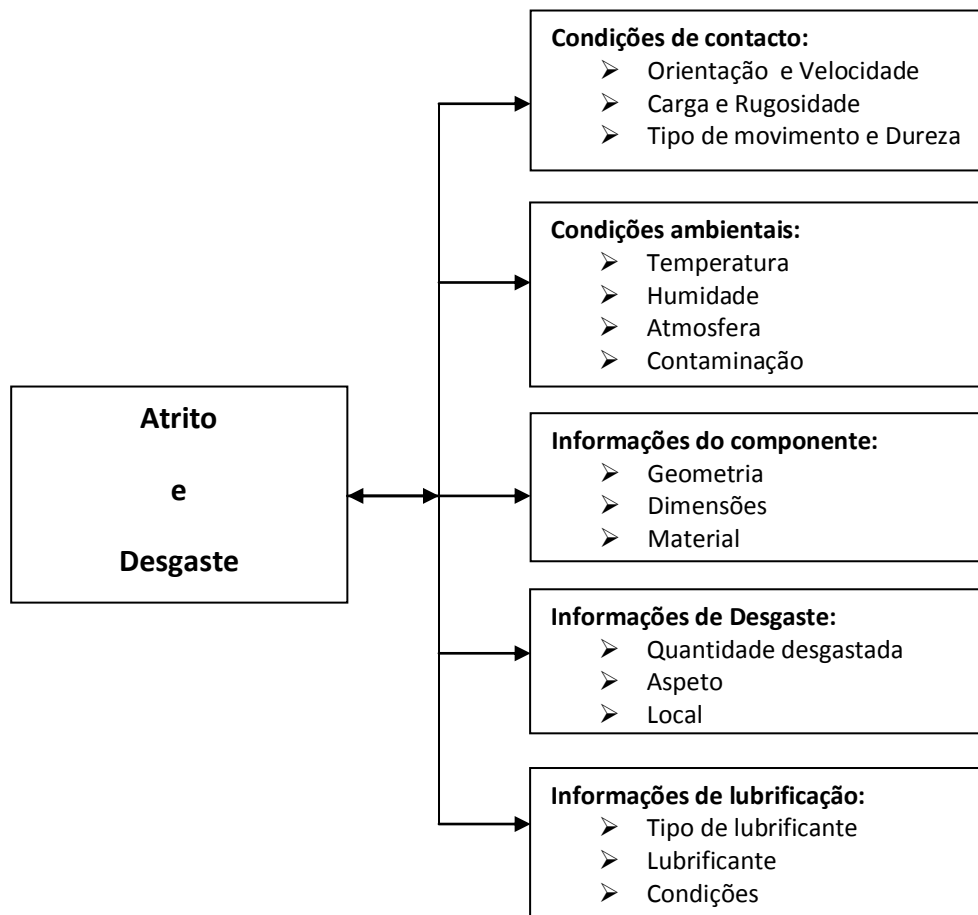


Figura 2.2 – Representação esquemática de alguns dos factores relevantes que condicionam o comportamento ao atrito e desgaste de um material.

2.3. Polietilenos

O polietileno faz parte de um grupo muito grande de polímeros, como também, por exemplo o policloreto de vinil (PVC), o polioximetileno (POM), o politereftalato de etileno (PET), a poliamida (PA) ou a poli-éter-éter-cetona (PEEK).

Um polímero é um composto químico de elevada massa molecular, resultante de reações químicas de polimerização. Este trata-se de uma macromolécula formada a partir de unidades estruturais menores, denominados monómeros. O número de unidades estruturais repetidas numa macromolécula é chamado de grau de polimerização. Em geral, os polímeros contêm os mesmos elementos nas mesmas proporções relativas que os seus monómeros mas em maior quantidade absoluta. Estes podem ser agrupados segundo várias classificações, nomeadamente quanto à sua natureza, estrutura, morfologia e à reação que os originou (Andrade, 1995; Gnauck & Fründt, 1991; Smith, 1998). Estas classificações são regidas segundo normas internacionais publicadas pela “International Union of Pure and Applied Chemistry” (Seymour B, 2002).

O polietileno, também denominado polieteno, é quimicamente o polímero mais simples. Segundo Gnauck & Frundt (1991) o polietileno é obtido pela polimerização do etileno. Como este polímero pode ser obtido por diferentes reações de polimerização, como por exemplo a polimerização aniónica e a polimerização catiónica, produz diferentes tipos de polietilenos. Assim, existe uma larga variedade de polietilenos, sendo que todos têm em comum a ligação etileno, podendo ser distinguidos pelo número de átomos de carbono presentes em cada grupo.

O primeiro polietileno foi produzido em 1934. Este é um polímero termoplástico logo tem como vantagem a sua versatilidade e facilidade de utilização, desprendendo-se geralmente da necessidade de máquinas e equipamentos muito elaborados e financeiramente dispendiosos. Pode ser fundido diversas vezes e alguns até podem dissolver-se em vários solventes. O polietileno é um dos tipos de plásticos mais comuns e também o mais barato, devido à sua produção mundial (Gnauck & Fründt, 1991; Mano, 1999).

A figura 2.3 exemplifica a formação da cadeia molecular do polietileno assim como um exemplo da sua cadeia ramificada que dará formação de diferentes tipos de polietilenos.

Comportamento Tribológico de Polietilenos

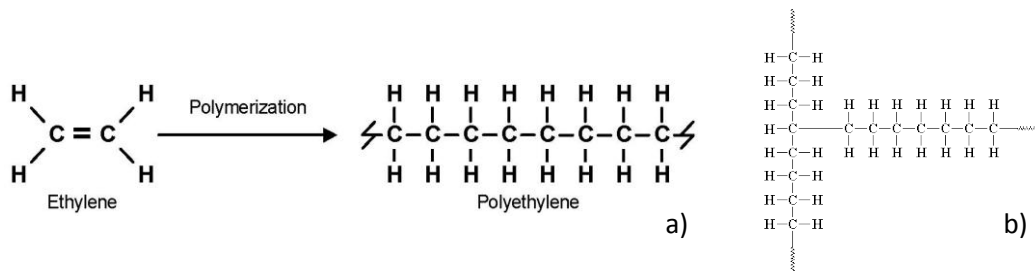


Figura 2.3 – Representação da formação da cadeia molecular linear do polietileno e um exemplo da ramificação da cadeia molecular do polietileno .⁴

A abreviatura geralmente usada para o polietileno é PE. Dependendo das condições reacionais e do sistema catalítico empregado na polimerização, pelo menos quatro tipos diferentes de polietileno podem ser produzidos por ramificação da cadeia linear do polietileno (Coutinho et al., 2003):

- *LDPE ou PEBD (Low Density)*: Polietileno de baixa densidade;
- *HDPE ou PEAD (High Density)*: Polietileno de alta densidade;
- *LLDPE ou PELBD*: Polietileno linear de baixa densidade;
- *UHMWPE ou PEUAPM*: Polietileno de ultra alto peso molecular;

O LDPE tem como propriedades alta resistência ao impacto, alta flexibilidade, boa processabilidade, estabilidade e propriedades elétricas notáveis. Além destas propriedades ainda é altamente resistente à água e a algumas soluções aquosas.

No caso do HDPE a linearidade das cadeias e conseqüentemente a maior densidade fazem com que a orientação, o alinhamento e o empacotamento das cadeias sejam mais intensas logo, a cristalinidade é maior, o que faz com que a temperatura de fusão seja mais elevada. Em geral, exibe baixa reatividade química, é insolúvel à temperatura ambiente e apresenta características de resistência e dureza superiores ao LDPE.

O LLDPE é semelhante ao LDPE tanto na morfologia como em algumas propriedades físicas mas como tem maior suscetibilidade à fratura resulta num processamento mais difícil.

O UHMWPE tem peso molecular superior e apresenta melhorias nas propriedades físicas do polietileno, tais como maior resistência à abrasão, boa resistência à corrosão, alta resistência à fratura, alta resistência química, alta dureza e baixo coeficiente de atrito.

⁴ Adaptação:

<http://www.coleparmer.com/TechLibraryArticle/828>

http://www.bedri.es/Libreta_de_apuntes/P/PO/Polietileno.htm

Comportamento Tribológico de Polietilenos

Na generalidade os polietilenos apresentam uma boa combinação de propriedades químicas, térmicas e mecânicas sendo ainda que a flexibilidade das cadeias de carbono contribuem para uma excelente auto-lubrificação, característica bastante interessante de alguns polímeros. Na tabela 2.1 encontram-se algumas propriedades características dos polietilenos (Coutinho et al., 2003).

Tabela 2.1 – Tabela com algumas propriedades características dos polietilenos.

Material	Densidade [g/cm ³]	Resistência à tração [MPa]	Módulo de flexão [x10 ² MPa]	Temperatura de fusão [°C]	Expansão térmica linear [x10 ⁻⁵ cm/°C]
LDPE	0.910 – 0.925	3.9 – 13.7	0.6 – 4.9	110 – 120	20
LLDPE	0.926 – 0.940	7.9 – 23.5	4.9 – 9.8	120 – 130	15
HDPE	0.941 – 0.965	20.6 – 37.3	6.9 – 14.7	130 – 135	14
UHMWPE	0.928 – 0.941	27.5 – 41.2	6.9 – 11.8	135	15

Atualmente os polímeros termoplásticos são amplamente utilizados em engenharia mecânica numa grande variedade de aplicações como rolamentos, engrenagens e cames, rodando sob deslizamento a seco, onde as suas propriedades auto-lubrificantes são exploradas para evitar a necessidade de lubrificação externa como óleos ou massas, com os problemas decorrentes de contaminação e necessidade de manutenção periódica. Na maioria dos *designs* de rolamentos, o polímero auto-lubrificante é combinado com uma contraface metálica rígida, geralmente feita de aço ou de alumínio, uma vez que os polímeros têm provado ser mais eficazes, no que diz respeito à performance de atrito e desgaste, contra uma contraface metálica do que ao deslizar contra si mesmos (Quaglini et al., 2009).

Os polietilenos são de grande interesse em engenharia sendo muito bem aceites nas indústrias aeronáutica, automóvel, eletrónica e química. O polietileno de alta densidade é normalmente utilizado em tubos de abastecimento de água, em condutas de saneamento e utilizados para o transporte de gás, óleo, sais minerais, entre outros. É usado também, como revestimento para tubos de aço, com a função primária de proteger esses tubos de danos causados pela corrosão, impacto, vibração e stress (Lucas et al., 2011). Já o polietileno de baixa densidade é mais aplicado como filmes para

Comportamento Tribológico de Polietilenos

embalagens industriais e agrícolas, como embalagens de alimentos líquidos e sólidos, embalagens para produtos farmacêuticos e hospitalares, brinquedos e utilidades domésticas, revestimento de fios e cabos, tubos e mangueiras. O LLDPE tem utilidades bastante semelhantes às do LDPE distinguindo-se principalmente por ser um termoplástico com elevada capacidade de selagem a quente, sendo muito utilizado em embalagens de géneros de primeira necessidade. No caso dos UHMWPE, devido às características de resistência à abrasão, ao impacto e a produtos químicos, auto-lubrificação, baixo coeficiente de atrito e outras já mencionadas, tornam-no adequado para as mais diversas aplicações na indústria química (tubos, bombas, válvulas, filtros, entre outros), na indústria alimentícia (transportadores, roletes, guias para linhas de embalagem), na indústria têxtil (tacos, guias, redutores de ruído), na mineração (revestimentos, misturadores, raspadores) e outras aplicações como artigos desportivos, ortopédicos e cirúrgicos (imobilizador rígido, colar cervical, componente acetabular) (Coutinho et al., 2003).

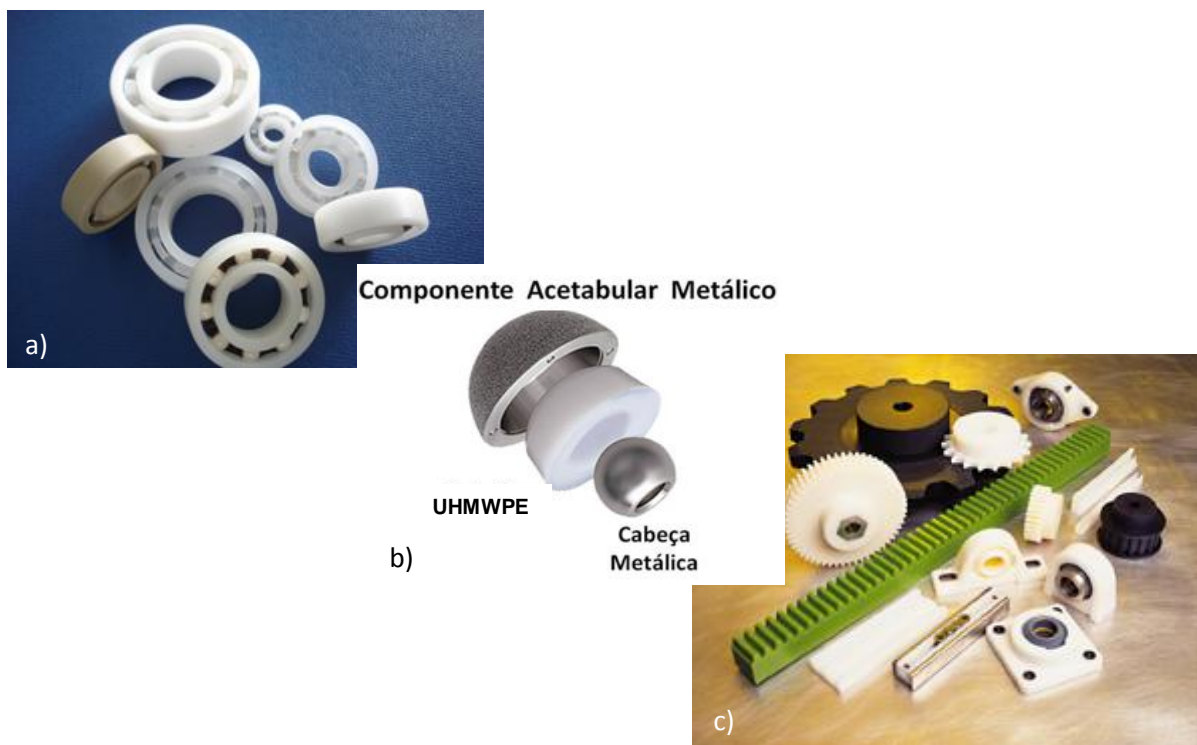


Figura 2.4 – Exemplo de algumas aplicações dos polietilenos, entre as quais rolamentos de esferas, componente acetabular, guias e rodas dentadas.⁵

⁵ Adaptado de:

<http://www.plasticmag.com/ta.asp?aid=3862>

<http://www.sbquadril.org.br/info-pacientes.php?ver=3>

<http://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/ball-bearing-61604.html>

2.4. Comportamento tribológico dos polietilenos

A utilização de materiais poliméricos é cada vez mais comum na indústria pois apresenta vantagens significativas na utilização de materiais plásticos nos projetos de máquinas devido à sua leveza, à maior resistência a agentes químicos, pela facilidade de ser moldado e por ser mais barato e mais reutilizável comparando com os metais (Feyzullahoglu & Saffak, 2008). Assim os polímeros e os seus compósitos estão a ser cada vez mais utilizados em algumas aplicações onde a resistência a vários tipos de desgaste abrasivo é importante (Harsha, 2011). Os problemas tribológicos de polímeros têm recebido mais atenção por causa das suas propriedades auto-lubrificantes muito importantes para o fabrico de elementos de máquinas para a indústria alimentícia (Unal & Mimaroglu, 2003). Neste caso, segundo os mesmos autores, os polímeros são amplamente utilizados em componentes de engenharia, como engrenagens e cames onde as suas propriedades auto-lubrificantes são exploradas para evitar a necessidade de óleos ou massas lubrificantes com os inerentes problemas de contaminação.

No entanto, a existência de contacto entre materiais cria um problema de atrito e desgaste (Unal & Mimaroglu, 2003). O desgaste é um dos parâmetros muito importantes no estudo do sistema tribológico polimérico, sendo esta uma propriedade intrínseca dos materiais que também depende dos parâmetros de funcionamento. Os mecanismos de desgaste relatados em deslizamento de polímeros contra contrafaces em aço são o desgaste à adesão e o desgaste à abrasão (Liu et al., 2006). A aceitabilidade dos materiais poliméricos para as condições de desgaste abrasivo depende em grande parte da sua capacidade mecânica de carga e do coeficiente de desgaste. Assim a resistência à abrasão de materiais poliméricos depende das propriedades intrínsecas mecânicas dos materiais, bem como sobre o método de ensaio utilizado (Harsha, 2011). A forma mais simples de desgaste é o desgaste abrasivo (Pal et al., 2010). O desgaste abrasivo é causado por asperezas rígidas sobre a contraface e/ou partículas duras que se movem sobre a superfície do polímero (Lucas et al., 2011). No caso do desgaste adesivo uma característica importante passa pela transferência de material polimérico macio para a contraface mais dura (Liu et al., 2006). Logo a resistência ao desgaste torna-se um importante factor uma vez que os materiais feitos de polietileno são criados para estar sempre em contacto com outros materiais, assim como objetos metálicos, o solo, a areia ou outras partículas sólidas, durante o armazenamento, transporte, instalação e uso (Lucas et al., 2011).

Outro parâmetro muito importante é o atrito. O atrito é parte integrante das nossas vidas quotidianas, em diversas ações comuns. Do ponto de vista pragmático, é também a questão-chave de muitos problemas industriais e económicos. Uma das principais razões para as dificuldades encontradas passa pela grande complexidade de

fenómenos mecânicos, térmicos e físico-químicos que ocorrem dentro de contactos e afetando os diferentes parâmetros utilizados nos modelos de atrito e desgaste (Renouf et al., 2011). O atrito entre os polímeros pode ser atribuído a dois mecanismos principais: deformação e adesão. No primeiro caso, o mecanismo que envolve a deformação passa pela dissipação de energia na área de contacto, enquanto a componente de adesão é responsável pelo desgaste do polímero e é um resultado da quebra das ligações entre as cadeias moleculares do polímero (Unal & Mimaroglu, 2003). Segundo Quaglini et al. (2009) os valores mais baixos do coeficiente de atrito dinâmico são obtidos por materiais com o módulo de elasticidade mais baixo sendo que, pelo contrário, os polímeros com o módulo de elasticidade elevado apresentam valores de coeficiente de atrito mais elevados. Estudos realizados por Tan et al. (2011) demonstraram que, entre doze polímeros, o UHMWPE e o HDPE são dos polímeros que apresentam melhor resistência ao desgaste em comparação a outros polímeros (observado no capítulo experimental).

O coeficiente de atrito durante o contacto depende também das propriedades da contraface de metal, incluindo a afinidade química com o polímero e a rugosidade da superfície (Quaglini et al., 2009). Assim a escolha da contraface sujeita ao deslizamento de um polímero contra a superfície da contraface é, também, muito importante pois quando a escolha recai sobre o aço percebe-se que é mais interessante por permitir uma boa dissipação do calor. Outra característica da tribologia polímero/metal é a criação de uma película de transferência do polímero contra uma contraface mais dura de metal. A criação e crescimento deste filme de transferência é geralmente seguido por uma diminuição moderada de atrito, uma vez que as asperezas afiadas da contraface dificultam a abrasão depois de ser abrangidos pelos fragmentos de polímero (Quaglini et al., 2009).

Também é conhecido que a adição de agentes de reforço de fibra, na maioria dos polímeros termoplásticos, irá melhorar a suas propriedades mecânicas. No entanto, este reforço não melhora a resistência ao desgaste se os mecanismos de desgaste são altamente abrasivos. Os reforços de fibra são utilizados, principalmente, para aumentar a vida dos componentes que são susceptíveis de serem expostos em ambiente moderadamente abrasivos, e também para resistir a danos mecânicos (Harsha, 2011).

Como já foi introduzido no início desta revisão bibliográfica, os factores que influenciam o comportamento tribológico dos polímeros, e por consequência, o atrito e o desgaste no comportamento de corpos em contacto em deslizamento são diversos (enumerados na figura 2.1). Os mais importantes, e que serão postos à prova, são a pressão de contacto e a velocidade de deslizamento (num factor relatado como a relação Pv do material), tendo em consideração as propriedades do material, a rugosidade, a temperatura provocada pelo deslizamento do polímero/metal e a presença de um agente lubrificante. Isto ainda para uma determinada distância a percorrer.

2.4.1. Carga

Segundo a primeira lei do atrito a carga normal é proporcional à força de atrito. Esta lei aplicada aos materiais poliméricos tem-se mostrado válida apenas para alguns tipos de polímeros testados sob determinadas condições (Myshkin et al., 2006). A dependência do coeficiente de atrito da carga é afetada pelas propriedades da contraface de metal, incluindo a afinidade química com o polímero e a rugosidade da superfície, assim como da temperatura atingida e da susceptibilidade do polímero em causa. (Budinski, 2001). Para a maioria dos plásticos de engenharia, o aumento da carga normal promove uma redução de atrito, mas o comportamento real de cada par polímero-contraface deve ser avaliado caso a caso (Quaglini et al., 2009).

De facto, o contacto interfacial faz-se através das asperidades da superfície, logo a área real de contacto corresponde a uma porção inferior à área aparente. Assim o aumento da carga normal leva a um aumento da área real de contacto devido à deformação elastoplástica das asperidades. Assim a pressão de contacto pode influenciar o coeficiente de atrito e o desgaste em materiais poliméricos, podendo depender da rugosidade dos materiais em contacto (Persson, 1999).

Myshkin et al. (2006) afirmam que o coeficiente de atrito permanece praticamente constante para uma dada gama de cargas diferentes em vários materiais poliméricos. Wang & Li (1999), Unal & Mimaroglu (2003) e Liu et al. (2006) observaram que o coeficiente de atrito do UHMWPE tende a aumentar com o aumento da carga, sendo ainda que esse aumento não é considerado muito significativo. Pode-se dizer, segundo esses autores, que o coeficiente de atrito permanece quase constante, na gama de valores utilizados nos seus ensaios, pois a variação final do coeficiente de atrito é menor que 0.1 para qualquer dos autores. Já Quaglini et al. (Quaglini et al., 2009) observam uma diminuição do coeficiente de atrito muito ligeira, menor que 0.025, pelo que se pode considerar que o coeficiente de atrito permanece praticamente constante. Logo pode dizer-se que não há afetação do coeficiente de atrito com o aumento da carga no caso de contactos envolvendo o UHMWPE.

2.4.2. Velocidade de deslizamento

O efeito da velocidade de deslizamento no desgaste de polímeros nem sempre segue a regra geralmente aceite que quanto maior a velocidade de deslizamento, maior o coeficiente de desgaste (Franklin, 2001). Assim, como outros factores, a velocidade de

deslizamento é altamente dependente do tipo de material a ser testado, do material da contraface e do sistema tribológico em estudo (Feyzullahoglu & Saffak, 2008). A influência da velocidade sobre o coeficiente de atrito dá-se através de dois mecanismos: viscoelasticidade e calor de atrito (Quaglioni et al., 2009). Myshkin et al. (2006) estudaram que a força de atrito pode ser independente da velocidade de deslizamento quando a variação da temperatura de contacto é insignificante, assim não alterando o seu comportamento de interface. Mas a separação entre o efeito da velocidade e a temperatura apresenta dificuldades significativas. É necessário analisar os resultados obtidos por diferentes investigadores com cautela. Ainda tendo por base o mesmo autor, a independência da velocidade foi revelada dentro de uma gama de velocidades muito limitada e apenas para alguns tipos de polímeros. Para o polietileno, a velocidades de deslizamento inferiores a 0.01m/s não influênciam o atrito nem o desgaste dos materiais (Myshkin et al., 2006).

Geralmente o aumento da velocidade de deslizamento origina uma subida da temperatura interfacial, provocando um aumento do coeficiente de atrito e um aumento do coeficiente de desgaste (Friedrich et al., 1995; Friedrich & Schlarb, 2008). Mas este aumento não é linear, depende do regime de velocidades. Como o principal efeito da velocidade é sobre a temperatura, isto traduz-se, quando testes e experiências são realizadas perto da temperatura de transição vítrea do material, a velocidade, neste caso, tem um efeito elevado sobre o atrito. Já quando a temperatura é baixa o coeficiente de atrito dificilmente se relacionará com a velocidade de deslizamento (Myshkin et al., 2006).

2.4.3. Factor p_v

O factor “Pv-limite” é um conceito empírico, que define as condições em que o desgaste rápido ou superaquecido de qualquer polímero irá ocorrer. Este factor é o produto da pressão nominal pela velocidade de deslizamento entre dois corpos em contacto deslizante entre si (Kashani et al., 2011). Ludema (1996) caracterizou o factor Pv como um parâmetro empírico que expressa a transição de desgaste moderado para desgaste severo de um componente polimérico.

Cada polímero tem o seu próprio factor Pv, portanto este limite precisa de ser medido com precisão, pois os polímeros não seguem a lei de Coulomb do atrito com precisão, pelo que o coeficiente de atrito é em função da pressão de contacto, velocidade de deslizamento e características da contraface (Kashani et al., 2011).

Jamison (1994) definiu o factor Pv como o valor limite para uma utilização normal de um polímero. Como é visível na figura 2.5, o limite superior da pressão é determinado pela resistência à compressão do polímero e a velocidade máxima é determinada pela estabilidade térmica, condutividade, geração de calor e configuração do material (Jamison, 1994). A forma da curva entre estes dois extremos é determinada pela taxa de desgaste admissível e dependerá do critério de desempenho estabelecido pelo utilizador final. Para valores abaixo do limite Pv, o desgaste é mais lento e no processo de fratura, as fendas vão aumentando o que provoca libertação de pequenas partículas de material (Stachowiak & Batchelor, 2005).

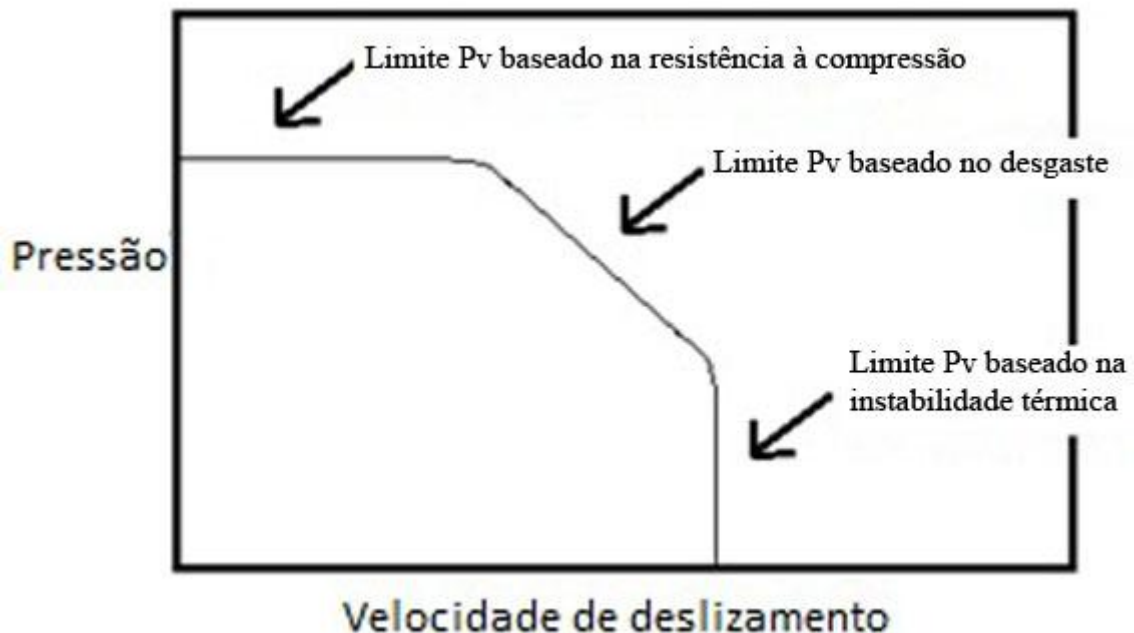


Figura 2.5 – Definição gráfica do factor Pv (Jamison, 1994).

Os valores de Pv, geralmente obtidos experimentalmente na investigação, variam de material para material e podem ser conseguidos em diversas publicações, com comparação entre vários polímeros, e/ou nos catálogos comerciais dos fabricantes de polímeros. As unidades geralmente utilizadas são [MPa.m/s]. Na tabela seguinte, tabela 2.2, serão enunciados os valores Pv utilizados por diversos autores nos seus ensaios e testes realizados com polietilenos de alta densidade, HDPE, e polietilenos de ultra alto peso molecular, UHMWPE, onde o material antagonista é o aço.

Tabela 2.2 – Valores P_v utilizados, para vários polietilenos, por diversos autores.

Autores	Material	Limite P_v [MPa.m/s]
(McNicol et al., 1995)	HDPE	1.0
(Wang & Li, 1999)	UHMWPE	0.73 – 2.9
(Silva et al., 1999)	HDPE	0.002 – 0.085
(Palabiyik & Bahadur, 2000)	HDPE	0.64
(Franklin, 2001)	UHMWPE	0.035 – 0.14
(Li et al., 2001)	UHMWPE	1.125 – 1.25
(Unal & Mimaroglu, 2003)	UHMWPE	0.62 – 2.5
(Unal et al., 2004)	UHMWPE	0.175 – 1.05
(Liu et al., 2006)	UHMWPE	0.5 – 1.25
(Cong et al., 2008)	HDPE	0.4
(Habib, 2008)	HDPE	0.008 – 0.45
(Quaglioni et al., 2009)	UHMWPE	0.05 – 1.5

2.4.4. Temperatura

A temperatura e o seu efeito é de importância crítica na tribologia dos polímeros. Depende muito das condições de ensaio, assim como do calor gerado pelo atrito entre ambas as superfícies, em contacto deslizante.

O atrito é um típico processo de dissipação no qual a energia mecânica é convertida em calor, logo a temperatura tem uma grande influência no coeficiente de atrito e de desgaste. Isto porque os polímeros termoplásticos são muito sensíveis à temperatura, influenciando as suas propriedades mecânicas (Myshkin et al., 2006).

A influência da temperatura no comportamento tribológico dos polímeros ocorre essencialmente com a interação de dois aspetos; um é a resistência ao calor do material e o outro é o calor de atrito desenvolvido entre os pontos de contacto. Como os polímeros

são materiais semi-cristalinos ou cristalinos apresentam excelentes estruturas caracterizadas pela simetria, regularidade e flexibilidade das cadeias moleculares pelo que são produzidas menores quantidades de calor provocadas pelo atrito entre os pontos de contacto. Devido às suas propriedades, os polietilenos apresentam pontos de fusão baixos mas mesmo assim apresentam taxas de desgaste baixas (comparativamente com polímeros amorfos), a partir do qual é visto que, para este tipo de polímeros, o calor desenvolvido pelo atrito é o factor dominante. Portanto a resistência ao desgaste relaciona-se não só com a estrutura molecular dos polímeros como também com o ponto de fusão e a temperatura de transição vítrea (Tan et al., 2011).

Quando é atingida a temperatura de transição vítrea de um polímero, o seu comportamento ao atrito e ao desgaste sofre uma grande alteração sendo que, com o aumento da temperatura, o coeficiente de atrito tende a diminuir e a taxa de desgaste tende a aumentar (Stachowiak & Batchelor, 2005). Nos seus testes, Quaglioni et al. (2009) também observaram que quando a temperatura de transição vítrea do polímero é atingida na interface, o atrito diminui.

2.4.5. Rugosidade

O efeito da rugosidade da contraface no comportamento tribológico do par em deslizamento é bastante difícil de analisar. Além do contacto entre corpos ocorrer a diferentes escalas de rugosidade, ainda divergem dependendo das propriedades mecânicas do material e da carga que lhe é aplicada (Bhushan, 1999).

Em geral, o aumento da rugosidade da superfície de contacto promove um aumento do coeficiente de atrito, embora nem todos os sistemas tribológicos sejam afetados da mesma forma pela rugosidade (Budinski, 2001). Este efeito é visto quando o aumento da rugosidade provoca um aumento efetivo da área real de contacto que conduz a um aumento do coeficiente de atrito e do coeficiente de desgaste quando os dois corpos estão sujeitos ao deslizamento de um contra o outro (Bhushan, 1999).

Franklin (2001) estudou, não só o efeito da rugosidade da contraface, como também a influência da direção da rugosidade e observou que o aumento da rugosidade da superfície da contraface leva a um aumento do coeficiente de desgaste de vários polímeros, como por exemplo o UHMWPE. Também se apercebeu que a direção da rugosidade influencia o coeficiente de desgaste, sendo que, geralmente, o desgaste é superior quando o deslizamento é efetuado perpendicularmente à direção da rugosidade da contraface.

2.4.6. Formação do filme

Uma característica da tribologia polímero/metal é a criação de uma película de transferência do polímero na contraface mais dura de metal (Quaglioni et al., 2009). A formação do filme depende das propriedades do polímero, isto é, módulo de elasticidade (resistência à deformação) e da viscosidade do polímero, assim como da adesão e do calor gerado pelo deslizamento entre os dois corpos, factores estes, influenciados pela pressão de contacto, velocidade de deslizamento, temperatura e rugosidade da contraface de metal (Ramanathan & Darling, 2011).

A principal dependência para a formação do filme passa pela transferência de material por adesão, pois sem este factor é impossível formar-se um filme (Gao et al., 1997). Uma vez que, para a maioria dos polímeros, a força das junções adesivas formadas entre o polímero e o metal são comparáveis com uma estrutura forte do polímero em si, a fratura ocorrida durante o deslizamento entre eles é acompanhada pela fragmentação do polímero, que fica depositado na contraface de metal (Quaglioni et al., 2009). Se as cadeias moleculares do polímero permitirem o fácil deslizamento e ocorrer uma ligação química da película de transferência à contraface forma-se então uma forte aderência criando um filme mais compacto e difícil de destruir. Esta ligação química aumenta gradualmente à medida que o deslizamento vai ocorrendo até se formar completamente um filme sobre a contraface de aço alterando o tipo de contacto tribológico de polímero/aço para polímero/polímero (Gao et al., 1997). A criação de um filme de transferência é importante para a redução do coeficiente de atrito e do coeficiente de desgaste no sistema tribológico polímero/metal (Gao, 2000).

Os polímeros semi-cristalinos caracterizados por um perfil molecular muito liso, como o polietileno de alta densidade (HDPE) e o polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), exibem uma descida do coeficiente de atrito depois de algum tempo a deslizar contra a contraface de metal. Este comportamento é consequência da orientação das cadeias moleculares tanto dentro da transferência do filme e do polímero deslizante, como da baixa força de aderência que representa o efeito de fácil deslizamento entre as cadeias moleculares, após terem sido alinhadas (Quaglioni et al., 2009).

2.4.7. Lubrificação

Um lubrificante é um material utilizado para reduzir o atrito e o desgaste entre dois corpos em contacto deslizante. É conhecido que, o comportamento tribológico dos

polímeros diverge bastante entre condições de deslizamento a seco e deslizamento em ambientes aquosos ou com outro tipo de fluídos (Chauhan et al., 2010). A lubrificação externa é um método muito útil para reduzir a adesão entre duas superfícies em contacto deslizante diminuindo assim o coeficiente de atrito comparativamente a condições de deslizamento a seco (Jia et al., 2007). A água é utilizada como lubrificante pois tem a capacidade de refrigerar e limpar a superfície de contacto entre o polímero e o aço.

As propriedades auto-lubrificantes dos polietilenos são extremamente importantes pois evitam a necessidade de adição de algum tipo de lubrificante para reduzir o atrito entre dois corpos (Coutinho et al., 2003). Como os polietilenos são polímeros com taxas de absorção de água extremamente baixas a sua lubrificação externa não trará prejuízo à integridade do polímero. Liu et al. (2006) observaram que o coeficiente de desgaste do polietileno de ultra alto peso molecular diminuiu nos testes realizados com lubrificante comparativamente com os testes realizados a seco para diferentes condições de ensaio.

2.5. Síntese

Os polímeros, e em especial os polietilenos, são materiais que, apesar da sua comum utilização atual, ainda se encontram em expansão no mercado mundial. Têm elevado interesse tribológico e industrial muito devido, em parte, à sua enorme procura, ao seu valor económico e às suas propriedades mecânicas. Mas a complexidade do comportamento deste tipo de material implica a necessidade de numerosos testes e estudos para a obtenção de conhecimento sobre o seu desempenho nas mais diversas situações. O seu comportamento ao atrito e ao desgaste depende, em grande parte, dos parâmetros de entrada no sistema tribológico, como a carga, a velocidade de deslizamento, a rugosidade da contraface, entre outras, e também das propriedades do material. Consoante os parâmetros de entrada serão obtidos diferentes parâmetros de saída, pelo que é necessário analisar todos os casos de estudo com detalhe. Na tabela 2.3 estão descritos os resultados obtidos no comportamento tribológico do polietileno por diversos autores, e na tabela 2.4 são mostrados os resultados obtidos no comportamento tribológico de outros polímeros por vários autores, sendo que cada autor utiliza diferentes parâmetros de entrada no sistema tribológico, dentro de um limite Pv já enunciado na tabela 2.2. Apesar da grande quantidade de estudos realizados no campo do comportamento tribológico dos polietilenos continua a ser necessário investigar melhor este tipo de material pois são inúmeros os parâmetros que influenciam o seu comportamento e, nem sempre, os resultados seguem a mesma tendência.

Comportamento Tribológico de Polietilenos

Tabela 2.3 – Ensaios efetuados por diversos autores com polietilenos e respetivos resultados.

Autor	Condições de ensaio								Resultados	
	Material da amostra	Dimensões da amostra (mm)	Tribómetro	Contraface de deslizamento	Distância percorrida [m]	Carga normal [N]	Velocidade deslizamento [m/s]	Lubrificação	W [mm ³ /(N.m)]	μ
(Unal et al., 2004)	UHMWPE	Ø6 x 50	“Pin-on-disc”	Aço AISI D2 R _a = 0.11 μm	1000	9.9	0.5	Não	2.17 x10 ⁻⁵	0.30
							1.0		2.17 x10 ⁻⁵	0.41
							2.0		3.25 x10 ⁻⁵	0.61
						19.8	1.0		2.17 x10 ⁻⁵	0.34
						29.7	1.0		2.17 x10 ⁻⁵	0.27
(Franklin, 2001)	UHMWPE	Ø3 x 0.5	“Oscillatin plate”	Aço R _a = 0.8 μm	-	5	0.05	Não	7.7 / 7.4(x10 ⁻⁷)*1	-
							0.2		43.2 / 3.9(x10 ⁻⁷)*1	-
(Palabiyik & Bahadur, 2000)	HDPE	Ø6 x 18	“Pin-on-disc”	Aço AISI 02 R _a = 0.10 μm	35000	19.6	1.0	Não	4.33 x10 ⁻⁶	0.31
(Wang & Li, 1999)	UHMWPE	10x10x5 Ø25	“Block-on-ring”	Aço ASTM 1045 R _a = 0.3 μm	3770	147	0.5	Não	-	0.09 – 0.14
						294	0.5		-	
						490	1.0		-	
						490	0.5		-	
(Liu et al., 2006)	UHMWPE	Ø5 x 10	“Pin-on-disc”	Aço inox 316	40 000	19.6	0.5	Não	15 x10 ⁻⁷	0.130
						49.1			8.2 x10 ⁻⁷	0.175
					40 000	19.6	0.5	Água/óleo (razão de 95/5)	2.3 x10 ⁻⁷	0.057
						49.1			1.5 x10 ⁻⁷	0.064
(Unal & Mimaroglu, 2003)	UHMWPE	Ø6 x 50	“Pin-on-disc”	Aço inoxidável	3168 – 6336	20	0.88	Não	7.79 x10 ⁻⁶	0.15
							1.76		-	-
						30	0.88		5.32 x10 ⁻⁶	0.18
							1.76		7.09 x10 ⁻⁶	0.18
						40	0.88		5.32 x10 ⁻⁶	0.20
							1.76		-	-

Comportamento Tribológico de Polietilenos

(Silva et al., 1999)	HDPE	Ø3 x 23	"Pin-on-disc"	Aço inoxidável R _a = 0.9 µm	5000	0.5	0.03	Não	0.8 x10 ⁻⁷	0.13
						2			2.2 x10 ⁻⁷	0.14
						5			2.5 x10 ⁻⁷	0.21
						10			3.1 x10 ⁻⁷	0.24
						20			6.3 x10 ⁻⁷	0.26
(da Silva & Sinatora, 2007)	UHMWPE	Ø5 x 20	"Pin-on-disc"	Alumina R _a = 0.3 a 0.6 µm	3500	50	0.1	Não	2.2 x10 ⁻⁷	-
							0.5		4.4 x10 ⁻⁷	-
							1.0		4.4 x10 ⁻⁷	-
						100	0.1		2.9 x10 ⁻⁷	-
							0.5		6.0 x10 ⁻⁷	-
						200	1.0		3.6 x10 ⁻⁶	-
							0.1		7.5 x10 ⁻⁷	-
							0.5		1.75 x10 ⁻⁶	-
						1.0		Melting	-	
(Cong et al., 2008)	HDPE	7 x 30 x 6 Ø40	"Block-on-ring"	Aço R _a = 0.2 e 0.1µm	380	196	0.42	Não	3.9 x10 ⁻⁶	0.19
(Habib, 2008)	HDPE	Ø12.70	"Ball-on-flat disc"	Aço SAE 52100 R _a = 0.08 µm	500	10 – 37	0.1	Não	1.1 x10 ⁻⁶	0.22–0.13
						10	0.1 – 1.5		1.1 x10 ⁻⁶	0.22
(Marcus, 2005)	UHMWPE	Ø5	"Pin-on-disc"	Aço R _a = 1.0 µm	-	1	0.2	Água	5.6 x10 ⁻⁷	-
							0.6		8.9 x10 ⁻⁷	-
							1.2		5.2 x10 ⁻⁷	-
							1.8		1.2 x10 ⁻⁷	-
							2.3		0.3 x10 ⁻⁷	-
						5	0.2		3.1 x10 ⁻⁷	-
							0.6		5.9 x10 ⁻⁷	-
							1.2		5.6 x10 ⁻⁷	-
							1.8		3.4 x10 ⁻⁷	-
							2.3		6.4 x10 ⁻⁷	-

Comportamento Tribológico de Polietilenos

(Li et al., 2001)	UHMWPE	∅8 x 15	“Pin-on-disc”	Aço Ti6Al4V R _a = 0.015 μm	120 000	251 – 226	0.25	Água destilada	3.77 x10 ⁻⁶	0.016 – 0.020	
(McNicol et al., 1995)	HDPE	∅3 x 10	“Pin-on-disc”	Aço Inoxidável R _a = 0.012 μm	150 000	40	0.24	N	HR Baixa	5.4 x10 ⁻⁷	-
								ã	HR Ambiente	2.6 x10 ⁻⁷	-
								o	HR Alta	9.9 x10 ⁻⁷	-
(Quaglino et al., 2009)	UHMWPE	∅65 x 6.7	“Flat bearing (flat-on-flat)”	Aço Austenítico R _a = 0.1 a 0.2 μm	Moviment os sinusoidais de 8mm	66 x10 ³	0.0025	Não	-	0.052	
							0.0125		-	0.055	
							0.022		-	0.060	
							0.042		-	0.062	
						99.5 x10 ³	0.0025		-	0.043	
							0.0125		-	0.049	
							0.022		-	0.052	
							0.042		-	0.055	
						116 x10 ³	0.0025		-	0.039	
							0.0125		-	0.040	
							0.022		-	0.042	
							0.022		-	0.042	
							0.042		-	0.047	

*1 Primeiro valor com rugosidade perpendicular, segundo valor com rugosidade paralela.

Comportamento Tribológico de Polietilenos

Tabela 2.4 – Ensaio efetuados por diversos autores com outros polímeros e respetivos resultados.

Autor	Condições de ensaio								Resultados	
	Material da amostra	Dimensões da amostra (mm)	Tribómetro	Contraface de deslizamento	Distância percorrida [m]	Carga normal [N]	Velocidade deslizamento [m/s]	Lubrificação	W [mm ³ /(N.m)]	μ
(Unal et al., 2004)	POM	∅6 x 50	"Pin-on-disc"	Aço AISI D2 R _a = 0.11 μm	1000	9.9	0.5	Não	2.10 x10 ⁻³	0.31
							1.0		5.06 x10 ⁻⁴	0.37
							2.0		3.10 x10 ⁻³	0.47
						19.8	1.0		2.10 x10 ⁻³	0.35
						29.7	1.0		1.22 x10 ⁻³	0.29
	PA66				1000	9.9	0.5	Não	8.94 x10 ⁻⁶	0.32
							1.0		8.94 x10 ⁻⁶	0.52
							2.0		2.68 x10 ⁻⁵	0.50
						19.8	1.0		8.94 x10 ⁻⁶	0.42
						29.7	1.0		8.94 x10 ⁻⁶	0.37
(Davim & Cardoso, 2009)	PEEK	∅8 x 12	"Pin-on-disc"	Aço AISI 1045 R _a = 0.5 μm	15 000	134.7	0.75	Não	9.08 x10 ⁻⁶	0.32
						402.1	0.25	Não	5.21 x10 ⁻⁶	0.21
(Habib, 2008)	POM	∅12.70	"Ball-on-flat disc"	Aço SAE 52100 R _a = 0.08 μm	500	10 – 37	0.1	Não	4.5 x10 ⁻⁷	0.26–0.36
						10	0.2 – 1.5		4.5 x10 ⁻⁷	0.26–0.3
	PA66				500	10 – 37	0.1	Não	4 x10 ⁻⁶	0.65–0.78
						10	0.3 – 1.5		4 x10 ⁻⁶	0.65–0.7
	PVC				500	10 – 37	0.1	Não	4.8 x10 ⁻⁵	0.63–0.74
						10	0.4 – 1.5		4.8 x10 ⁻⁵	0.63–0.82
(Franklin, 2001)	POM	∅3 x 0.5	"Oscillatin plate"	Aço R _a = 0.8 μm	-	5	0.05	Não	30.4/ 3.1(x10 ⁻⁵)*2	-
						5	0.2		3.6/ 1.96(x10 ⁻⁴)*2	-
	PA66				-	5	0.05	Não	11.2/ 1.3(x10 ⁻⁵)*2	-
						5	0.2		5.56/ 4.1(x10 ⁻⁵)*2	-

Comportamento Tribológico de Polietilenos

(Feyzullahoglu & Saffak, 2008)	POM	Ø50 x 50	“HFN “	Aço AISI 440C	45 200	95	0.52	Não	-	0.30
							1.04		-	0.355
							1.57		3.31 x10 ⁻⁵	0.38
							2.09		-	0.385
	PET					95	0.52	Não	-	0.325
							1.04		-	0.333
							1.57		1.14 x10 ⁻⁵	0.355
							2.09		-	0.41
(Bhimaraj et al., 2008)	PET	6.3 x 6.3 x 12.7	“Linear reciprocating tribometer”	Aço 347 R _a = 0.1–0.2 µm	-	250	5.2	Não	17.5 x10 ⁻⁶	0.33
(Greco et al., 2011)	PEEK	Ø 4.76 (bola) Ø 114 (disco)	“High Speed Ball-on-disc”	Aço 440C (Bola)	-	0.73	65	Não	3	0.155
						2.5			1.5	0.115
						5			3.8	0.08
						10			Não mensurável	0.06
(Sumer et al., 2008)	PEEK	Ø6 x 10	“Pin-on-disc”	Aço AISI D2 R _a = 0.28 – 0.35 µm	-	50	0.8	Não	1.1 x10 ⁻⁵	0.4
						100			1.7 x10 ⁻⁵	0.39
						150			1.4 x10 ⁻⁵	0.39
						50	1.6		1.4 x10 ⁻⁵	0.37
						100			2.0 x10 ⁻⁵	0.37
						150			1.95 x10 ⁻⁵	0.375

*1 Primeiro valor com rugosidade perpendicular, segundo valor com rugosidade paralela.

Capítulo 3.

3. Procedimiento Experimental

Procedimento Experimental

3.1. Materiais ensaiados

Os materiais ensaiados foram o HMWPE, o UHMWPE, o PVC, o POM-C, o PET, o PA66 e o PEEK. Estes foram adquiridos à empresa *Lanema* em varões de, aproximadamente, 10mm de diâmetro e 500mm de comprimento, para a maioria dos materiais, sendo que para o PA66 os varões são de, aproximadamente, 12mm de diâmetro e 8mm de diâmetro para o PEEK, pelo mesmo comprimento. Os polietilenos (HMWPE e UHMWPE) serão os materiais alvo de ensaios mais diversos e intensivos.

3.1.1. HMWPE

O HMWPE também denominado como *PE 500*, tem um peso molecular aproximadamente de 500 mil g/mol. É um material fisiologicamente inerte e associa uma boa combinação de rigidez e tenacidade. Também possui uma boa resistência química.⁶ Na tabela 3.1 podemos observar as principais vantagens e aplicações do HMWPE.

Tabela 3.1 – Principais vantagens e aplicações do HMWPE.⁶

Vantagens:	Aplicações:
<ul style="list-style-type: none">➤ Boa resistência química, ao desgaste e à abrasão;➤ Boa resistência ao impacto, inclusive a baixas temperaturas;➤ Excelentes propriedades no que se refere à absorção de água (baixa);➤ Resistência mecânica à deformação moderada;➤ Boas propriedades dielétricas;➤ Boa maquinabilidade.	<ul style="list-style-type: none">➤ Placas de corte para mesas de trabalho da indústria alimentar;➤ Elementos para drenagem de água;➤ Partes de bombas em contacto com produtos agressivos;➤ Vários tipos de aplicações mecânicas, químicas e elétricas.

⁶ Adaptado de: <http://www.lanema.pt/>

3.1.2. UHMWPE

O UHMWPE, também denominado PE 1000, é um plástico de engenharia, com 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. Este material é normalmente moldado por compressão ou extrudido na forma semi-acabada.⁷ Na tabela 3.2 podemos observar de um modo qualitativo as principais vantagens e aplicações do UHMWPE.

Tabela 3.2 – Principais vantagens e aplicações do UHMWPE.⁷

Vantagens:	Aplicações:
<ul style="list-style-type: none">➤ Elevada resistência ao desgaste;➤ Excelente resistência química;➤ Alta resistência ao impacto, mesmo a baixas temperaturas;➤ Baixo coeficiente de atrito;➤ Muito baixa absorção de água;➤ Resistência mecânica à deformação moderada;➤ Muito boas propriedades dielétricas e muito bom isolamento elétrico;➤ Boa maquinabilidade;➤ Fisiologicamente inerte;➤ Não é auto-extinguível;➤ Boa resistência a radiações de energia (Gama e Raios-X).	<ul style="list-style-type: none">➤ Indústrias de conservas e empacotamento;➤ Indústrias química e de galvanização;➤ Equipamento criogénico;➤ Fabrico de peças e componentes em geral;➤ Fusos para transportadoras;➤ Equipamentos de armazenamento e transporte;➤ Guias de corrente;➤ Peças para bombas;➤ Estrelas e Curvas;➤ Silos;➤ Implantes ortopédicos articulares.

3.1.3. PVC

O PVC, ou policloreto de vinil é rígido, de uma massa dura, fisiologicamente atóxico e de peso específico 1,40 g/cm³. Como todos os termoplásticos, endurece com o frio e suaviza com o calor. Por esta razão a sua resistência mecânica aumenta mesmo a baixas temperaturas e diminui a sua resistência ao impacto. Por outro lado, quando sujeito a uma temperatura superior a 40°C a sua resistência mecânica baixa aumentando a sua resistência ao impacto.⁷ Na tabela 3.3 podemos observar de um modo qualitativo as principais vantagens e aplicações do PVC.

⁷ Adaptado de: <http://www.lanema.pt/>

Tabela 3.3 – Principais vantagens e aplicações do PVC.⁸

Vantagens:	Aplicações:
<ul style="list-style-type: none">➤ Material rígido;➤ Fisiologicamente atóxico;➤ Alta resistência mecânica;➤ Boa resistência ao impacto.	<ul style="list-style-type: none">➤ Componentes e máquinas para indústria química e galvanoplastia;➤ Revestimentos antiácidos;➤ Revestimentos de depósitos;➤ Fabrico de bombas e seus elementos;➤ Revestimento de paredes;➤ Fabrico de peças mecânicas;➤ Torres de lavagem de gases.

3.1.4. POM-C

O POM-C é um polioximetileno. Este material tem maior estabilidade dimensional do que as poliamidas, no entanto com menor resistência ao desgaste. O POM-C (Copolímero) é mais resistente às hidrólises, às soluções alcalinas fortes e à degradação por oxidação térmica do que o POM-H (Homopolímero).⁸ Na tabela 3.4 podemos observar as principais vantagens e aplicações do POM-C.

Tabela 3.4 – Principais vantagens e aplicações do POM-C.⁸

Vantagens:	Aplicações:
<ul style="list-style-type: none">➤ Alta resistência mecânica;➤ Alto módulo de elasticidade;➤ Boa resistência à fluência⁹;➤ Elevada resistência ao impacto;➤ Excelente estabilidade dimensional;➤ Boa maquinabilidade;➤ Elevada resistência a químicos;➤ Fisiologicamente inerte.	<ul style="list-style-type: none">➤ Peças de precisão;➤ Rodas dentadas de módulo pequeno;➤ Acoplamentos, luvas e elementos de válvulas;➤ Casquilhos;➤ E vários tipos de peças onde se necessita de melhor acabamento e estabilidade dimensional.

⁸ Adaptado de: <http://www.lanema.pt/>

⁹ Fluência é uma deformação ao longo do tempo de um material submetido a uma carga ou tensão constante.

3.1.5. PET

O PET, ou politereftalato de etileno, é um PET cristalino no estado virgem. As propriedades específicas deste fazem do PET um material particularmente adaptado para peças mecânica de precisão expostas a cargas elevadas e sujeitas a grande desgaste.¹⁰ Na tabela 3.5 podemos observar de um modo qualitativo as principais vantagens e aplicações.

Tabela 3.5 – Principais vantagens e aplicações do PET.¹⁰

Vantagens:	Aplicações:
<ul style="list-style-type: none">➤ Elevada resistência mecânica, rigidez e dureza;➤ Muito boa resistência à fluência;➤ Coeficiente de atrito baixo;➤ Excelente resistência ao desgaste;➤ Muito boa estabilidade dimensional;➤ Fisiologicamente inerte.	<ul style="list-style-type: none">➤ Casquilhos, guias e rodízios;➤ Engrenagens de baixo módulo sem impacto;➤ Peças de precisão;➤ Peças isoladoras;➤ Próteses dentárias;

3.1.6. PA 66

A PA 66, é uma poliamida. Este material possui melhor resistência mecânica ao calor e ao desgaste assim como maior rigidez que a PA 6. No entanto a sua resistência ao impacto e a capacidade de amortecimento mecânico são menores.¹⁰ Na tabela 3.6 podemos observar de um modo qualitativo as principais vantagens e aplicações do PA66.

Tabela 3.6 – Principais vantagens e aplicações da PA 66.¹⁰

Vantagens:	Aplicações:
<ul style="list-style-type: none">➤ Maior resistência mecânica ao calor e ao desgaste do que a PA 6;➤ Ótima resistência à fluência;➤ Boa maquinabilidade;➤ Menor poder amortecedor.	<ul style="list-style-type: none">➤ Rodas dentadas de módulos altos;➤ Rodas e rolos;➤ Casquilhos;➤ Separadores;➤ Peças de grandes dimensões sujeitas a cargas elevadas.

¹⁰ Adaptado de: <http://www.lanema.pt/>

3.1.7. PEEK

O material PEEK obtém-se a partir de resina de poli-éter-éter-cetona. Este material avançado de estrutura semi-cristalina mostra uma combinação única de propriedades mecânicas elevadas, resistência a altas temperaturas e uma excelente resistência química, fazendo deste o mais conhecido material avançado para engenharia.¹¹ Na tabela 3.7 podemos observar de um modo qualitativo as principais vantagens e aplicações do PEEK.

Tabela 3.7 – Principais vantagens e aplicações da PEEK.¹¹

Vantagens:	Aplicações:
<ul style="list-style-type: none">➤ Temperatura máxima de serviço ao ar elevada;➤ Alta resistência mecânica, à fluência e dureza inclusive a altas temperaturas;➤ Excelente resistência química e à hidrólise;➤ Excelente comportamento ao desgaste;➤ Resistência intrínseca à chama;➤ Muito boa estabilidade dimensional;➤ Boas propriedades dielétricas e bom isolamento elétrico;➤ Excelente resistência às radiações de alta energia (Raios X e Gama).	<ul style="list-style-type: none">➤ Diversas aplicações nas indústrias médica, farmacêutica e alimentícia.

3.1.8. Propriedades dos materiais utilizados

Na tabela 3.8 são descritas propriedades gerais dos polímeros, sendo que a densidade, o tipo e a cristalinidade dos polímeros foram retirados da obra dos autores Gnauck & Frundt (1991) e a temperatura de fusão e a temperatura de transição vítrea retiradas na obra do autor Callister (1999). Na tabela 3.9 estão presentes algumas das propriedades dos materiais utilizados, valores obtidos dos catálogos da empresa *Lanema*, à qual foi adquirido o material, sendo que a tabela completa das propriedades é remetida para o anexo.

¹¹ Adaptado de: <http://www.lanema.pt/>

Tabela 3.8 – Tabela de propriedades físicas e térmicas dos polímeros.

Materiais	Densidade (g/cm³)	Tipo	Cristalinidade	Temperatura de fusão (°C)	Temp. de transição vítrea (°C)
HDPE	0.941 – 0.945	Termo-plástico	Semi-cristalino	154	-90
UHMWPE	0.93 – 0.94	Termo-elástico	Semi-cristalino	135 – 138	-
PET	1.37	Termo-plástico	Semi-cristalino	265	69
POM	1.42	Termo-plástico	Semi-cristalino	175	85
PA66	1.13 – 1.16	Termo-plástico	Semi-cristalino	265	57
PVC	1.16 – 1.35	Termo-plástico	Amorfo	212	87
PEEK	1.29	Termo-plástico	Semi-cristalino	334	143

Tabela 3.9 – Tabela das propriedades dos polímeros utilizados.¹²

Materiais	Unidades	HMWPE	UHMWPE	PET	POM-C	PA66	PVC	PEEK
Densidade	g/cm ³	0.96	0.93	1.39	1.41	1.14	1.4	1.31
Taxa de absorção de água (saturação a 23°C)	%	0.01	0.01	0.50	0.80	8	-	0.54
Temperatura de fusão	°C	135	135	245	165	260	-	340
Temperatura de transição vítrea	°C	-	-	-	-	-	80	-
Condutividade térmica a 23°C	W/K.m	0.40	0.40	0.29	0.31	0.28	0.14	0.25
Temperatura de deformação sob carga (1.8MPa)	°C	44	42	80	100	85	-	160
Resistência à tração	MPa	28	19	90	66	93	>55	115
Módulo de elasticidade	MPa	1300	750	3500	2800	3550	>3100	4300

3.1.9. Material antagonista

O material utilizado para os discos de contraface foi obtido a partir de um varão de aço de construção de norma Ck45K–DIN, cuja composição apresenta 0.45% C, 0.25% Si e 0.65% Mn. O valor médio de dureza é de 220HB.¹³ Os discos têm um diâmetro aproximado de 80mm e uma espessura de 8mm e foram previamente retificados a fim de terem a rugosidade média aritmética (Ra) pretendida para os ensaios (entre 0.5 a 2µm na direção perpendicular à rugosidade e 0.2 a 0.9µm na direção paralela à rugosidade). A figura 3.1 mostra os discos utilizados nos ensaios.

¹² Adaptado de: <http://www.lanema.pt/>

¹³ Adaptado de: <http://www.ramada.pt/>



Figura 3.1 – Imagem dos discos utilizados nos ensaios.

3.1.10. Geometria dos pinos e dos adaptadores

As amostras a serem utilizadas nos ensaios foram cortadas em pinos de 10mm de altura, mantendo o seu diâmetro (10mm para o PE-HMW, o PE-UHMW, o PVC, o POM-C, o PET, 12mm para o PA66 e 8mm para o PEEK). Para aplicar os pinos no tribómetro foram fabricados adaptadores, ilustrados na figura 3.2 em conjunto com os pinos, a fim de suportarem as amostras a testar. A rugosidade média aritmética (Ra) dos pinos está compreendida entre os 5 μ m e os 8 μ m.



Figura 3.2 – Imagem da geometria dos pinos e dos adaptadores.

3.2. Equipamentos utilizados

3.2.1. Tribómetro pino sobre disco

O equipamento de ensaio utilizado foi o tribómetro de pino sobre disco, Plint® TE67/HT, presente na figura 3.3. Este permite ensaiar diferentes materiais (pinos) contra diferentes contrafaces (material antagonista), controlando a carga, a velocidade de deslizamento e a temperatura pretendida pelo operador na execução do ensaio do sistema tribológico em questão, a ser estudado com o objetivo de se determinar o comportamento tribológico do material, a ser testado, ao atrito e ao desgaste.



Figura 3.3 – Tribómetro pino sobre disco Plint® TE67/HT.

Este equipamento é composto por um sistema de fixação rígido do pino e do disco, e por um sistema de carga pneumático, que no caso de cargas muito reduzidas é substituído por um sistema de cargas por pesos mortos. O controlo, observação e avaliação dos dados introduzidos inicialmente e obtidos no decorrer do ensaio é comandado por um computador adjacente ao tribómetro com recurso a um *software* apropriado, o *Compend 2000 V2.1*, desenvolvido pela mesma entidade que projetou e fabricou o tribómetro, a *Phoenix-Tribology*. Na tabela 3.10 estão descritos os principais parâmetros de funcionamento do tribómetro sendo que no manual fornecido (Partners, 1998) encontrar-se-ão todos os seus parâmetros de funcionamento.

Tabela 3.10 – Parâmetros de funcionamento do tribómetro Plint® TE67/HT.

Parâmetros	Limites de funcionamento
<i>Velocidade de deslizamento</i>	✓ Desde, virtualmente, zero (raio mínimo) até 4m/s (raio máximo, 39mm, e velocidade angular máxima, 1000rpm).
<i>Carga aplicada</i>	✓ 5 a 100N (pesos mortos); ✓ 50 a 1000N (carga pneumática).
<i>Temperatura</i>	✓ Temperatura ambiente até 200°C, em testes lubrificados; ✓ Temperatura ambiente até 400°C, em testes a seco; ✓ Temperatura ambiente até 700°C, em testes com sistema de aquecimento a gás.

Mais concretamente, o *software* permite, além da introdução dos parâmetros de funcionamento do ensaio e da sua visualização na interface do programa, também permite visualizar a evolução destes, assim como do desgaste, da força de atrito, da temperatura e do potencial de contacto no decorrer do ensaio. Os parâmetros de saída são continuamente medidos e registados durante o ensaio, por meio de um potenciómetro, um transdutor e um pirómetro, ou um termopar nos ensaios lubrificados, sendo estes guardados num ficheiro Excel. A figura 3.4 mostra a interface do software utilizado nos ensaios tribológicos.

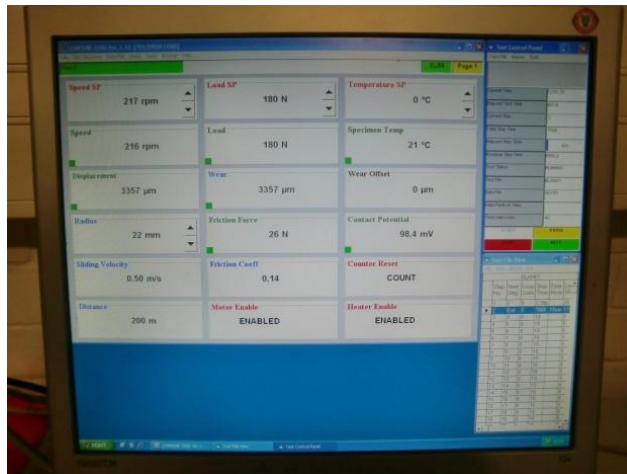


Figura 3.4 – Imagem da interface do software utilizado para os ensaios tribológicos.

3.2.2. Rugosímetro

Inicialmente, para se determinar a rugosidade média aritmética dos discos e dos pinos utilizados nos ensaios foi necessário utilizar um rugosímetro de apalpação mecânica, projetado e fabricado pela *Hommel-Etamic*, da série *Tester T1000*. Este apresenta o valor médio de R_a da superfície em análise, o mais importante neste caso, entre outros parâmetros também fornecidos pelo rugosímetro. A figura 3.5 mostra o rugosímetro.



Figura 3.5 – Rugosímetro Hommel Tester T1000 utilizado na medição da rugosidade dos discos e das amostras.

3.2.3. Balança analítica

Como para o cálculo do desgaste resultante dos testes é necessário medir a perda de massa após cada ensaio, pelo que será necessário pesar a amostra antes de realizar cada ensaio e depois de terminado esse mesmo ensaio. Assim será utilizada uma balança analítica, *Melter GR200*, com uma resolução de 0.1mg e uma capacidade máxima de pesagem de 210g, na qual será medida a massa do pino antes e após cada ensaio. A figura 3.6 mostra a balança analítica utilizada.



Figura 3.6 – Imagem da balança analítica na qual foi determinada a massa da amostra.

3.2.4. Microscópio Óptico

Após efetuados os ensaios será feita uma observação das superfícies desgastadas, baseada na microscopia óptica, utilizado um microscópio Óptico *Eclipse Lv150 (Nikon)*, representado na figura 3.7. Este microscópio permite ampliações de 5x, 10x, 20x, 50x e 100x, por meio de um conjunto de diferentes objetivas, e tem um sistema de câmara integrado que permite a captação da superfície em análise no microscópio através de um *software* (Perfect-Image V7.5) para um computador a fim de melhor análise e posterior tratamento das imagens, sendo que o microscópio ainda permite ajustes à luminosidade. Esta análise é um complemento fundamental para a compreensão do comportamento tribológico ao atrito e ao desgaste dos materiais em estudo.



Figura 3.7 – Imagem do microscópio óptico utilizado na observação das superfícies desgastadas dos discos e das amostras.

3.3. Metodologia experimental

Como já foi introduzido, os ensaios foram realizados no tribómetro pino sobre disco. Primeiramente, antes de ser efetuado cada ensaio, a amostra e o disco foram devidamente limpos com álcool etílico. Posteriormente, a amostra foi pesada na balança analítica, também já descrita, a fim de se determinar a massa inicial do pino. Em seguida, colocou-se o pino no adaptador e fixou-se ao braço de carga por meio de uma bucha de aperto. Já o disco é fixo no porta-discos através de um parafuso no centro deste. Depois destas tarefas estarem concluídas, faz-se a programação do ensaio no *software* disponibilizado, o *Compend 2000 V2.1*, e inicia-se em seguida o ensaio. Durante a execução deste, todos os dados disponibilizados pelo equipamento vão sendo guardados no respetivo ficheiro de dados (em formato Excel), para o posterior tratamento desses mesmos dados. Terminado o ensaio, volta-se a fazer a medição de massa do pino na balança analítica. E, por fim, é feita uma análise das superfícies desgastadas recorrendo ao microscópio óptico. As imagens 3.8 e 3.9 exemplificam o tipo de contacto entre o pino e o disco assim como a sua configuração.

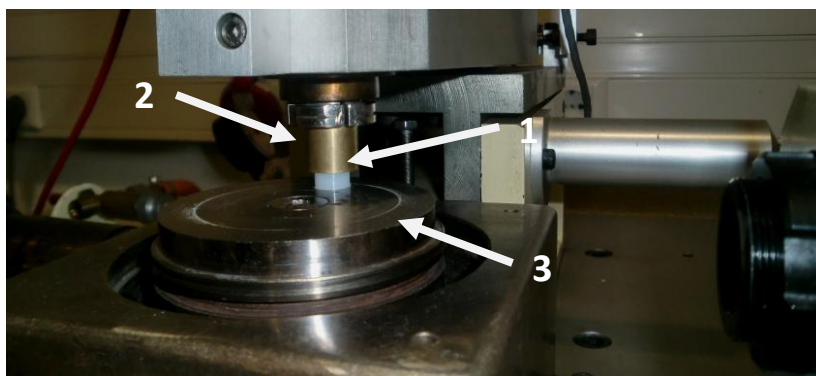


Figura 3.8 – Imagem da configuração dos ensaios realizados onde é visível o pino de um determinado material (1), o seu suporte (2) e o disco de contraface (3).

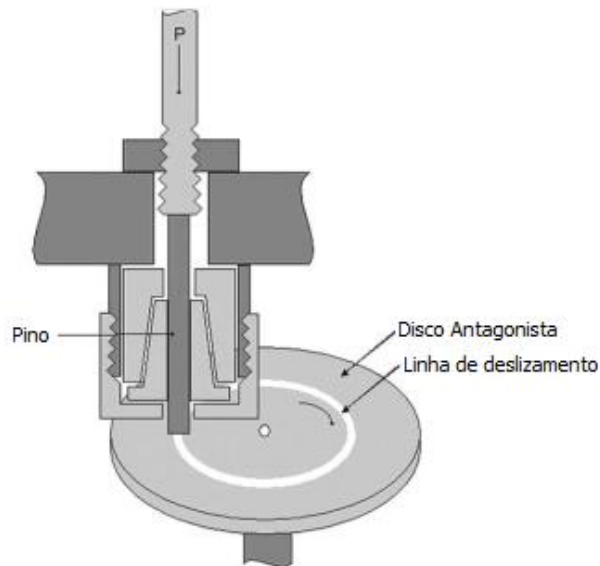


Figura 3.9 – Exemplificação do contacto entre o pino e a contraface que cria uma pista de deslizamento, também denominada como filme de transferência (Unal et al., 2004).

A tabela 3.11 mostra as condições para o primeiro esquema de ensaios onde foi comparado o comportamento tribológico dos polietilenos, HMWPE e UHMWPE, com outros polímeros, PVC, POM-C, PET, PA66 e PEEK. Nota para o facto do ensaio do PVC ter acabado sensivelmente a meio (aos 1650 metros percorridos), pois já tinha desgasto todo o material possível. A tabela 3.12 mostra as condições de ensaios para o segundo esquema onde se pretendeu estudar a influência da pressão de contacto no comportamento tribológico dos polietilenos. Na tabela 3.13 são observáveis as condições para o terceiro esquema de ensaios, que estuda a influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico dos polietilenos. Por fim, na tabela 3.14 estão as condições de ensaios para o quarto esquema de ensaios onde foi efetuado o estudo o comportamento tribológico dos polietilenos em meio aquoso comparativamente com o deslizamento em seco.

Nos ensaios realizados foram utilizadas amostras testemunho, sendo que a variação da massa dessas amostras, sujeita apenas às condições ambiente, após o ensaio foi de 0.1mg, logo é desprezável.

Para cada ensaio efetuado a temperatura ambiente, assim como a humidade relativa, tiveram aproximadamente, uma variação de 0.5°C e 2%, respetivamente. E a medição da rugosidade dos discos foi determinada das direções paralela e perpendicular à retificação dos discos, respetivamente. O raio visto no tribómetro, e utilizado no disco, mantém-se igual para todos os ensaios.

Comportamento Tribológico de Polietilenos

Tabela 3.11 – Condições para o primeiro esquema de ensaios efetuados.

Pino			Disco	Condições de ensaio						
Material	Diâmetro	Massa inicial	Rugosidade	Rugosidade	Limite P.v	Pressão	Velocidade	Distância	Temperatura	Humidade Relativa
	\varnothing [mm]	M [mg]	Ra [μ m]	Ra [μ m]	Pv [MPa.M/s]	P [MPa]	V [m/s]	L [m]	T [°C]	HR [%]
HMWPE	10.66	837.1	Aproximadamente entre 5 e 8	0.37/1.14	1	2	0.5	3500	22.5	45
UHMWPE	10.32	789.7		0.69/1.85					21.5	54
PVC	10.36	1224.4		0.66/1.88					21	46
POM-C	10.26	916.9		0.74/1.64					21	55
PET	10.53	1205.3		0.90/1.63					19.5	63
PA66	12.46	1406.3		0.40/1.67					23.5	67
PEEK	8.41	731.9		0.46/1.69					21	56

Tabela 3.12 – Condições para o segundo esquema de ensaios efetuados.

Pino			Disco	Condições de ensaio						
Material	Diâmetro	Massa inicial	Rugosidade	Rugosidade	Limite P.v	Pressão	Velocidade	Distância	Temperatura	Humidade Relativa
	\varnothing [mm]	M [mg]	Ra [μ m]	Ra [μ m]	Pv [MPa.M/s]	P [MPa]	V [m/s]	L [m]	T [°C]	HR [%]
HMWPE	10.69	825.2	Aproximadamente entre 5 e 8	0.37/1.14	0.5	1	0.5	3500	20	54
	10.69	847.5		0.47/1.72	0.75	1.5			19.5	62
	10.66	837.1		0.37/1.14	1	2			22.5	45
	10.69	850.3		0.72/1.96	1.25	2.5			20	52
UHMWPE	10.34	776.0		0.23/0.92	0.75	1.5			22	72
	10.32	789.7		0.69/1.85	1	2			21.5	54
	10.33	782.0		0.79/1.09	1.25	2.5			21.5	72
	10.36	792.2		0.58/1.22	1.5	3			22	71

Tabela 3.13 – Condições para o terceiro esquema de ensaios efetuados.

Pino			Disco	Condições de ensaio						
Material	Diâmetro	Massa inicial	Rugosidade	Rugosidade	Limite P.v	Pressão	Velocidade	Distância	Temperatura	Humidade Relativa
	\varnothing [mm]	M [mg]	Ra [μ m]	Ra [μ m]	Pv [MPa.M/s]	P [MPa]	V [m/s]	L [m]	T [°C]	HR [%]
HMWPE	10.69	825.2	Aproximadamente entre 5 e 8	0.37/1.14	0.5	1	0.5	3500	20	54
	10.68	836.2		0.24/1.12	0.75		0.75		20	76
	10.69	831.2		0.44/1.23	1		1		20.5	75
	10.69	843.1		0.68/1.78	1.25		1.25		19.5	66
UHMWPE	10.32	789.7		0.69/1.85	1	2	0.5		21.5	54
	10.32	788.2		0.25/0.74	1.5		0.75		23	68
	10.32	786.5		0.39/0.61	2		1		23	64
	10.33	788.9		0.48/0.92	2.5		1.25		23.5	65

Tabela 3.14 – Condições para o quarto esquema de ensaios efetuados.

Pino				Disco	Condições de ensaio						
Material	Tipo de ensaio	Diâmetro	Massa inicial	Rugosidade	Rugosidade	Limite P.v	Pressão	Velocidade	Distância	Temperatura	Humidade Relativa
		\varnothing [mm]	M [mg]	Ra [μ m]	Ra [μ m]	Pv [MPa.M/s]	P [MPa]	V [m/s]	L [m]	T [°C]	HR [%]
HMWPE	Seco	10.66	837.1	Aproximadamente entre 5 e 8	0.37/1.14	1	2	0.5	3500	22.5	45
	Aquoso	10.69	835.0		0.30/0.99					22.5	70
UHMWPE	Seco	10.32	789.7		0.69/1.85					21.5	54
	Aquoso	10.34	714.1		0.23/0.76					22	70

Capítulo 4.

4. Resultados e sua Discussão

Resultados e sua Discussão

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios efetuados. Estes resultados encontram-se divididos em diversas secções ordenadas consoante os seguintes objetivos:

- Comparar o comportamento tribológico dos polietilenos, HMWPE e UHMWPE, com outros polímeros, PVC, POM-C, PET, PA66 e PEEK;
- Estudar a influência da pressão de contacto no comportamento tribológico de polietilenos;
- Estudar a influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico de polietilenos;
- Estudar o comportamento tribológico de polietilenos em meio aquoso;
- Analisar as superfícies de desgaste dos discos e das amostras.

Na primeira fase dos estudos desenvolvidos são efetuados ensaios com as mesmas condições tribológicas para vários polímeros com o objetivo de compreender a diferença do comportamento tribológico dos polietilenos, HMWPE e UHMWPE, comparativamente a outros polímeros, nomeadamente o PVC, o POM-C, o PET, o PA66 e o PEEK.

Sendo que a maioria dos estudos realizados com polietilenos centram-se no UHMWPE, e como o HMWPE é um polietileno menos investigado do ponto de vista tribológico, possivelmente devido à baixa resistência ao desgaste, em comparação com o UHMWPE (como será visto mais à frente), é importante comparar o comportamento tribológico do HMWPE com outros polímeros, assim como analisar as diferenças entre o UHMWPE e o HMWPE.

As propriedades físicas e mecânicas dos materiais poliméricos são muito sensíveis à temperatura, assim é necessário realizar ensaios perante condições de pressão de contacto e de velocidade de deslizamento diferentes para melhor compreender como estes dois parâmetros influenciam o comportamento tribológico de polietilenos. Também será realizado um estudo tribológico em meio aquoso para comparar o efeito do deslizamento de um polietileno em água comparativamente ao deslizamento a seco. Isto

porque os polietilenos são utilizados, por vezes, em condições de elevada humidade ou mesmo em ambientes aquosos. De referir, também, que a maioria dos ensaios foram sujeitos a novos ensaios de repetição com o objetivo de confirmar os resultados obtidos.

4.1. Desempenho tribológico de cada material

Para este estudo foi comparado os dois polietilenos, o HMWPE e o UHMWPE, com os polímeros PVC, PET, PEEK, PA66 e POM-C. Tendo em conta os valores P_v utilizados por diversos investigadores nos seus estudos (Cong et al., 2008; Habib, 2008; Liu et al., 2006; Quaglini et al., 2009; Unal et al., 2004), optou-se por um valor de 1MPa.m/s para estes ensaios. Na tabela 4.1 são mostrados os parâmetros de pressão de contacto, velocidade de deslizamento e distância percorrida utilizados nos ensaios.

Tabela 4.1 – Condições utilizadas nos ensaios.

Parâmetros	$P_v=1$ [MPa.m/s]
<i>Pressão de contacto [MPa]</i>	2
<i>Velocidade de deslizamento [m/s]</i>	0.50
<i>Distância percorrida [m]</i>	3500

Na figura 4.1 pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento para os sete materiais poliméricos (HMWPE, UHMWPE, PVC, PET, PEEK, PA66 e POM-C) ensaiados. Verifica-se que tanto os polietilenos como o PVC e o POM-C têm coeficientes de atrito semelhantes. O PET e o PEEK apresentam um coeficiente de atrito superior aos polietilenos, ao PVC e ao POM-C sendo que a PA66 é o polímero com o coeficiente de atrito mais elevado, consequência principal do aquecimento por atrito. Apesar da queda do coeficiente de atrito da PA66 após a formação regular de um tribofilme (a partir, aproximadamente, dos 1000 metros) esta, ainda assim, apresenta um coeficiente de atrito superior aos restantes polímeros testados. Como se pode verificar na figura 4.2, a temperatura atingida pela PA66 é bastante mais elevada que qualquer outra dos restantes polímeros. Analisando mais em detalhe os polietilenos, ainda na figura 4.1, observa-se que ambos têm o coeficiente de atrito muito idêntico. Notar ainda para o facto do ensaio com o PVC ter terminado aos 1600 metros pois já tinha ocorrido o desgaste total do material, devido ao facto do PVC ser um material altamente abrasivo. Os valores do coeficiente de atrito obtidos nos ensaios estão

Comportamento Tribológico de Polietilenos

muito próximos, ou mesmo dentro do intervalo de valores obtidos por diversos autores (Feyzullahoglu & Saffak, 2008; Habib, 2008; Silva et al., 1999; Sumer et al., 2008).

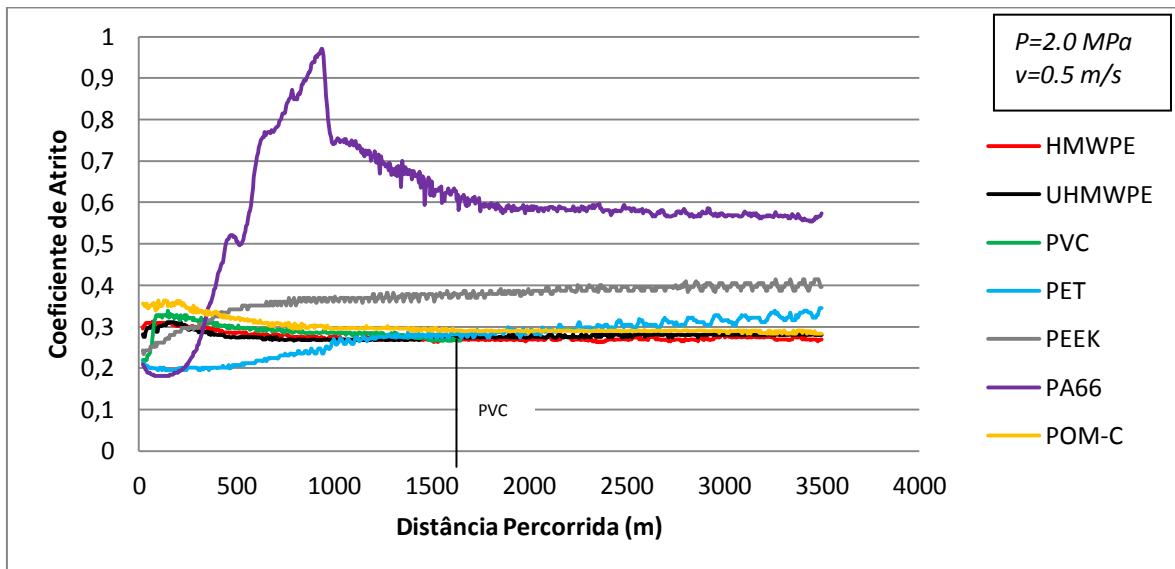


Figura 4.1 – Evolução do coeficiente de atrito dos vários polímeros em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.1.

Na figura 4.2 é observável a evolução da temperatura registada na aresta da superfície dos discos em função da distância de deslizamento dos vários polímeros em estudo. Verifica-se que a PA66 atinge uma temperatura muito superior a qualquer dos outros polímeros. Analisando os polietilenos é visível que o HMWPE atinge uma temperatura mais elevada que o UHMWPE (aproximadamente 10°C). O PET é o polímero que atinge a menor temperatura.

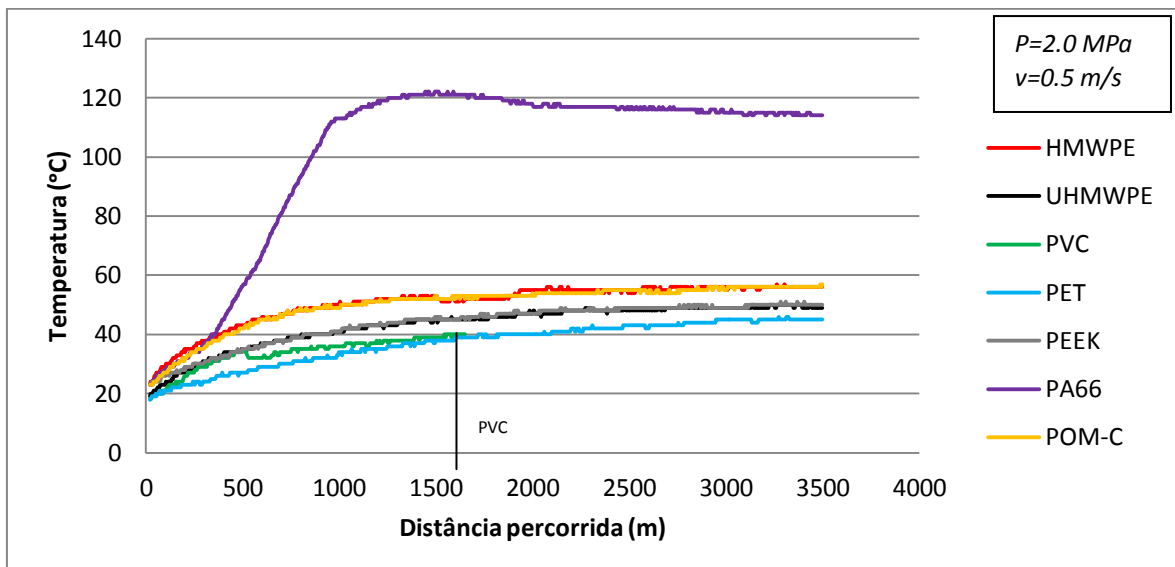


Figura 4.2 – Evolução da temperatura registada à superfície dos discos em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.1.

Comportamento Tribológico de Polietilenos

Na figura 4.3 encontram-se representados os valores do coeficiente de desgaste de todos os polímeros testados. Observa-se que o PVC é o polímero com um coeficiente de desgaste muito superior a qualquer outro polímero. O HMWPE e o POM-C também apresentam coeficientes de desgaste superiores ao PA66, ao PET, PEEK e UHMWPE. Na figura 4.4, é representado em detalhe a diferença dos coeficientes de desgaste do PA66, do PET, do PEEK e do UHMWPE. Observa-se que o UHMWPE é o polímero com melhor resistência ao desgaste, seguido do PEEK, do PET e do PA66, respetivamente.

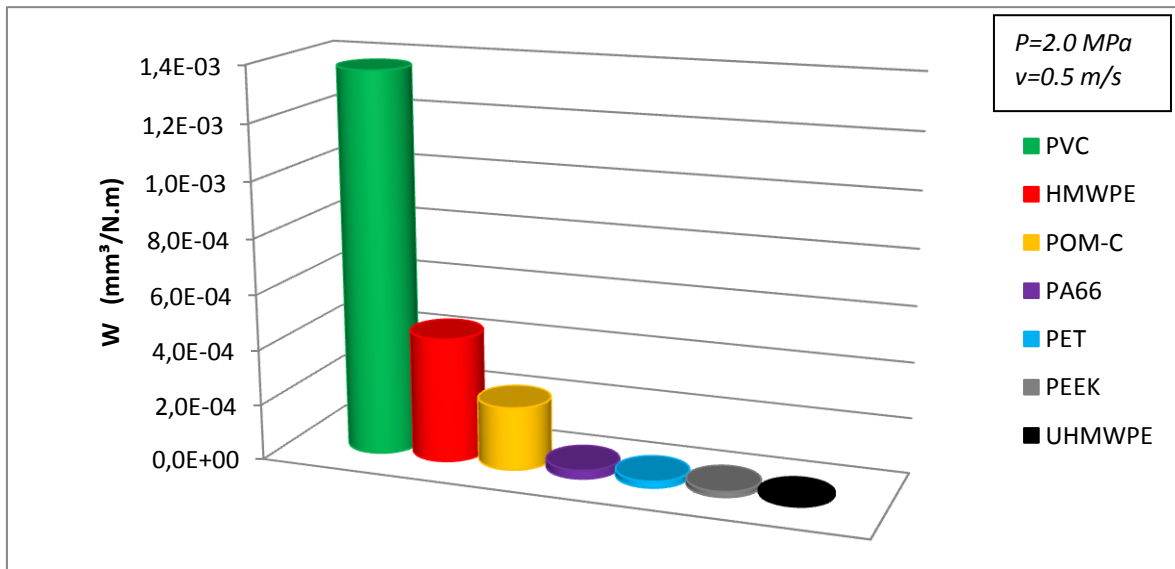


Figura 4.3 – Coeficiente de desgaste, W , dos vários polímeros para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.1.

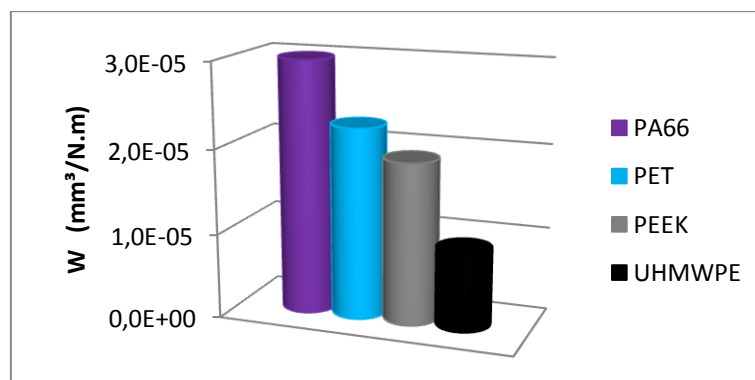


Figura 4.4 – Coeficiente de desgaste do PA66, do PET, do PEEK e do UHMWPE para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.1.

A tabela 4.2 mostra os resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados após os ensaios, para todos os polímeros em estudo. O coeficiente de atrito é idêntico para os polietilenos, para o PVC e para o POM-C. O PET apresenta um coeficiente de atrito superior, seguido do

PEEK e, por fim, da PA66. Como se pode verificar, a temperatura atingida pelo HMWPE é superior à temperatura máxima de deformação sob carga sugerida pelo fabricante, assim como o UHMWPE também está ligeiramente a cima dessa temperatura (44°C para o HMWPE e 42°C para o UHMWPE). Apenas a PA66 está muito a cima da temperatura máxima de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (85°C). Os restantes polímeros encontram-se a baixo da temperatura máxima de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (160°C para o PEEK, 100°C para o POM-C e 80°C para o PET).

Tabela 4.2 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para todos os polímeros em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.1.

Material	μ	T_f [°C]	W [mm³/(N.m)]
HMWPE	0.27	56	4.48 x10 ⁻⁴
UHMWPE	0.28	49	9.18 x10 ⁻⁶
PVC	0.27	40	1.37 x10 ⁻³
PET	0.35	45	2.25 x10 ⁻⁵
PEEK	0.40	50	1.90 x10 ⁻⁵
PA66	0.57	114	2.99 x10 ⁻⁵
POM-C	0.28	57	2.26 x10 ⁻⁴

4.1.1. Comparação das superfícies dos discos, após deslizamento

Na figura 4.5 podem observar-se as imagens dos discos, após o deslizamento de cada material, nas condições $P_v=1\text{MPa.m/s}$. Apenas no ensaio do UHMWPE, figura 4.5b, não ocorre deposição visível de material sobre o disco, sendo que só no caso do disco onde ocorreu o deslizamento do PA66, figura 4.5f, ocorreu a formação completa de um tribofilme. Nos restantes discos verifica-se adesão de material preferencialmente sobre a direção perpendicular da retificação dos discos comparativamente à direção de deslizamento, o que corrobora com estudos realizados por Franklin (2001) sobre a influência da direção da rugosidade no deslizamento de alguns polímeros. A quantidade de material aderente varia consoante o polímero utilizado. Tanto para o PET, figura 4.5c, como para o PEEK, figura 4.5g, a adesão de material é consistente com a formação de um tribofilme, sendo este incompleto. Para o HMWPE, figura 4.5a, e o POM-C, figura 4.5d, dá-se ainda menos adesão material à superfície do disco, não sendo esta suficiente para se considerar que se dá a formação de um tribofilme nas condições de ensaio utilizadas, comparativamente ao PET e ao PEEK. No caso do PVC, figura 4.5e, é menor ainda a adesão de material ao disco, comparativamente ao HMWPE e o POM-C.

Comportamento Tribológico de Polietilenos

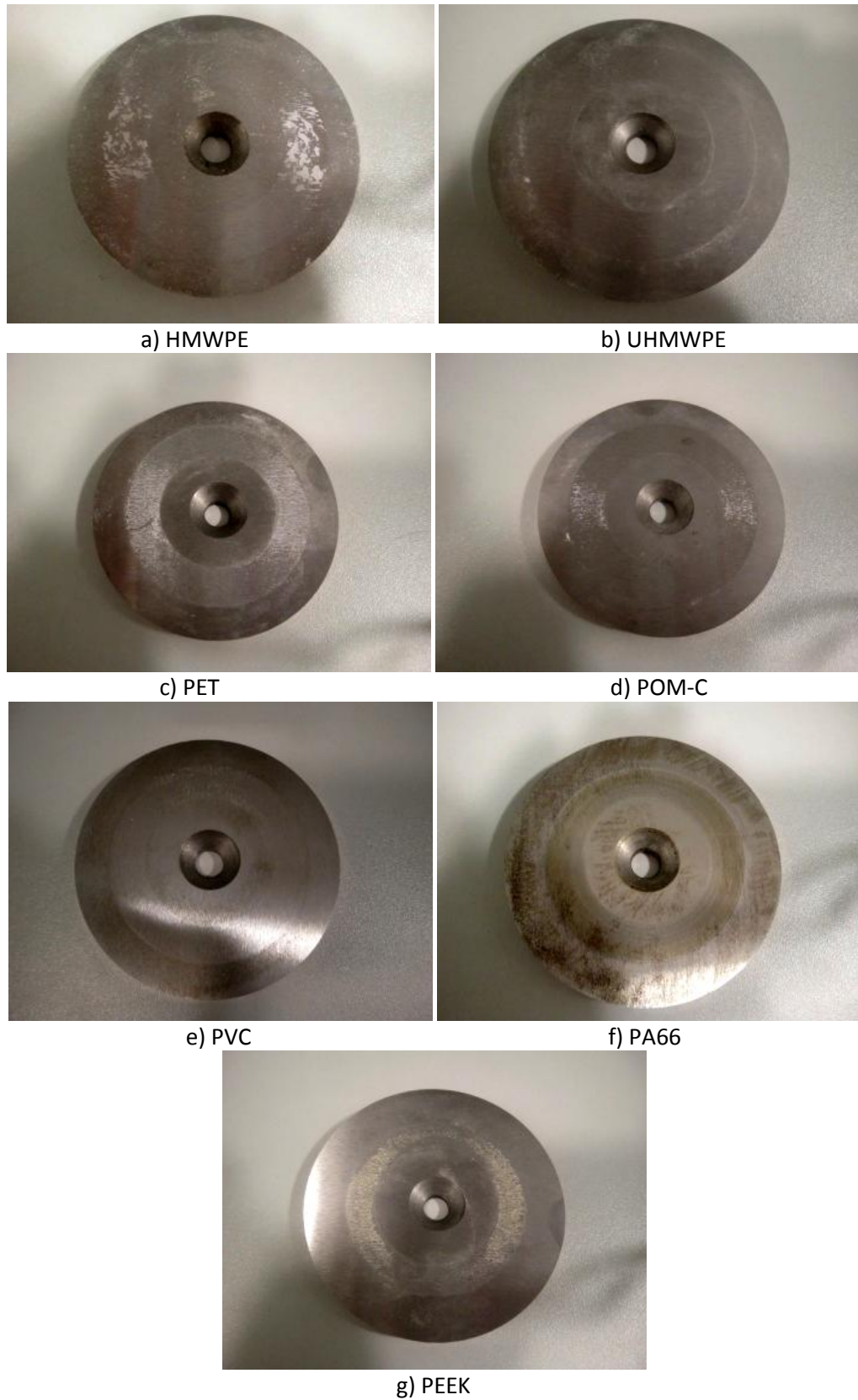
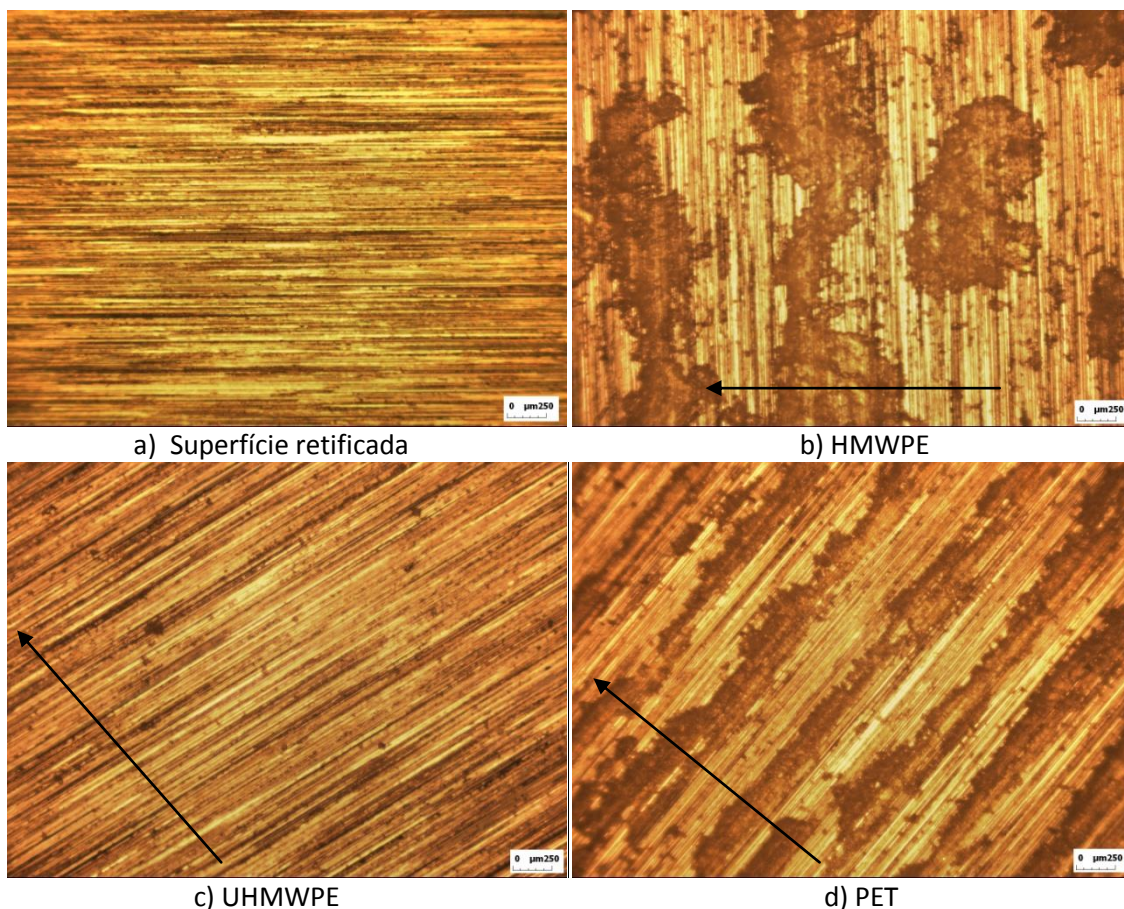


Figura 4.5 – *Imagens dos discos após ensaios com $P_v=1\text{MPa}\cdot\text{m/s}$.*

Comportamento Tribológico de Polietilenos

Na figura 4.6 podem observar-se as imagens da superfície dos discos, obtidas através do microscópio óptico, após o deslizamento de cada material, nas condições $P_v=1\text{MPa.m/s}$. Para termo de comparação é utilizada uma imagem do disco retificado, figura 4.6a. Como se pode observar, a deposição do material foi diferente para os diferentes materiais testados. Pode observar-se que os mecanismos de desgaste predominantes são a adesão e a abrasão. O HMWPE, figura 4.6b, e o POM-C, figura 4.6e, apresentam uma deposição visível de material, pelo que o mecanismo de desgaste predominante é a adesão. O PET, figura 4.6d, e o PEEK, figura 4.6h, observa-se uma formação irregular de tribofilme, sendo os mecanismos de desgaste predominantes, nestes casos, são a adesão e a abrasão (tendo como consequência a formação de um tribofilme). Para a PA66, figura 4.6g, é visível a formação de um filme completo sobre a superfície do disco, pelo que, o mecanismo de desgaste predominante é a adesão. Relativamente ao PVC, figura 4.6f, apresenta uma deposição pouco visível de material. Já para o UHMWPE, figura 4.6c, pode dizer-se que não existe adesão de material na face do disco, visto que não apresenta diferenças visíveis comparativamente ao disco com a superfície retificada, figura 4.6a.



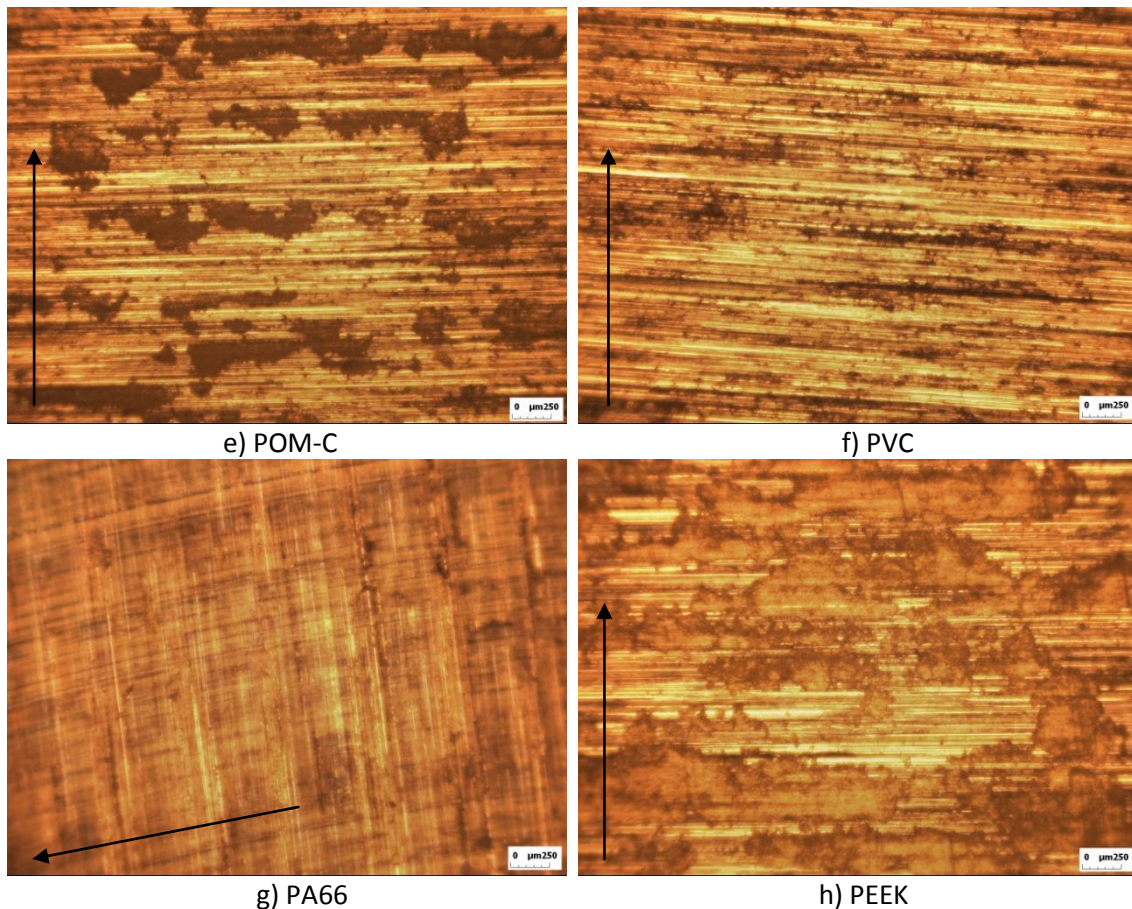


Figura 4.6 – *Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios com $P_v=1\text{MPa.m/s}$.*

Após a análise da figura 4.5 e da figura 4.6 é mais perceptível o comportamento tribológico de cada material num escorregamento a seco com o aço como material antagonista. O UHMWPE exibe o melhor desempenho perante as mesmas condições de ensaio que os outros seis materiais. Concilia o coeficiente de desgaste baixo, e inferior aos outros polímeros, com o coeficiente de atrito também baixo. O facto do UHMWPE ter um peso molecular tão elevado (5×10^6 g/mol) apresenta ligações moleculares cruzadas extremamente fortes, que resistem a movimentos vibracionais e rotacionais das cadeias moleculares evitando assim a degradação do polímero. Com esta alta densidade de ligações cruzadas o movimento molecular fica virtualmente impossibilitado, ao ponto que este polietileno não experimenta uma transição vítrea ou o seu consequente amolecimento (Callister, 1999; Gnauck & Fründt, 1991). Isto resulta numa elevada resistência ao desgaste por parte do UHMWPE. Como o HMWPE tem um peso molecular inferior ao UHMWPE (0.5×10^6 g/mol) isso implica ligações das cadeias moleculares mais fracas pelo que a resistência ao desgaste diminui consideravelmente. Assim pode ser explicado o facto do HMWPE ter um coeficiente de desgaste elevado.

4.2. Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico de polietilenos

Para compreender a influência da pressão de contacto no comportamento tribológico de polietilenos foram realizados ensaios com diferentes pressões de contacto. Como a diferença na resistência ao desgaste é grande optou-se por testar o HMWPE para factores Pv preferencialmente inferiores a 1MPa.m/s, sendo que para o UHMWPE optou-se pelo contrário. Na tabela 4.3 estão apresentadas as condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento utilizadas nos ensaios.

Tabela 4.3 – Condições utilizadas nos ensaios para 3500m.

Parâmetros	Pv=0.5 [MPa.m/s]	Pv=0.75 [MPa.m/s]	Pv=1 [MPa.m/s]	Pv=1.25 [MPa.m/s]	Pv=1.50 [MPa.m/s]
Para HMWPE					
Pressão de contacto [MPa]	1	1.5	2	2.5	-
Velocidade de deslizamento [m/s]	0.50	0.50	0.50	0.50	-
Para UHMWPE					
Pressão de contacto [MPa]	-	1.5	2	2.5	3
Velocidade de deslizamento [m/s]	-	0.50	0.50	0.50	0.50

4.2.1. Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico do HMWPE

Na figura 4.7 pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, obtida nos ensaios realizados ao HMWPE com diferentes pressões de contacto.

Analisando os resultados verifica-se que o coeficiente de atrito tende a aumentar com o aumento da pressão de contacto contudo pode também verificar-se que apesar do aumento da pressão de contacto, de 1MPa para 2.5MPa, o coeficiente de atrito apenas variou 0.03 pelo que se conclui que a factores Pv entre os 0.5 e os 1.25 [MPa.m/s] a variação do coeficiente de atrito para o HMWPE não parece significativa, logo a pressão de contacto, nesta gama de valores, não influencia o comportamento do HMWPE.

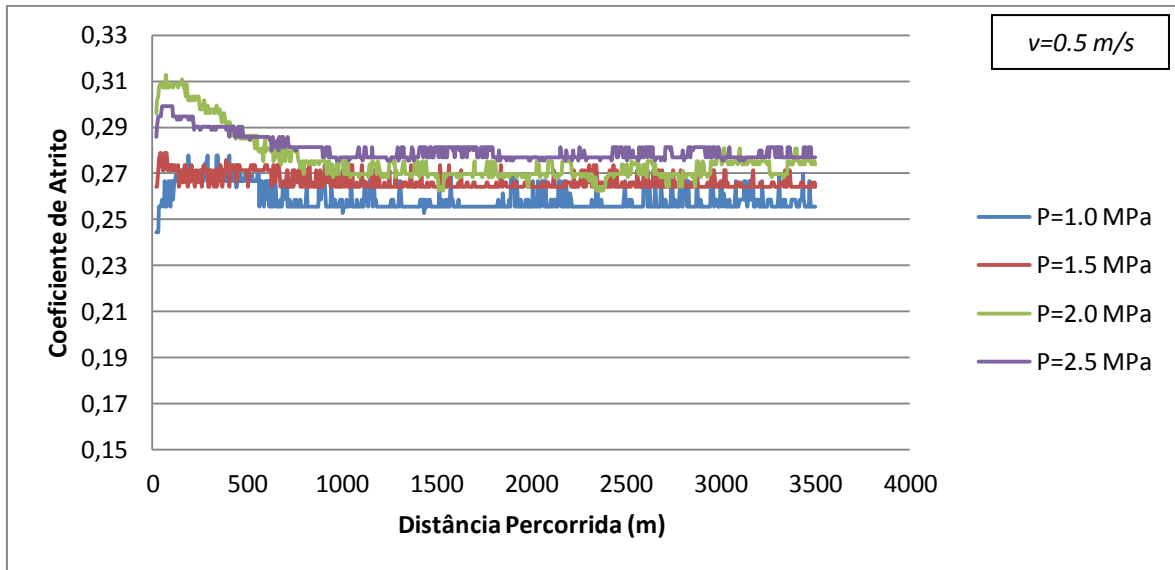


Figura 4.7 – Evolução do coeficiente de atrito, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.

Na figura 4.8 pode observar-se a evolução da temperatura à superfície do disco, para o ensaio com o HMWPE, em função da distância de deslizamento para quatro diferentes pressões de contacto. A temperatura é medida na aresta do disco por um pirómetro óptico, logo não é a temperatura exacta de contacto entre o material e o disco. É possível verificar-se que a temperatura aumenta com o aumento da pressão de contacto. Também se verifica que o aumento da temperatura apresenta uma evolução semelhante para todos os casos, até começar a estabilizar em redor de uma temperatura final.

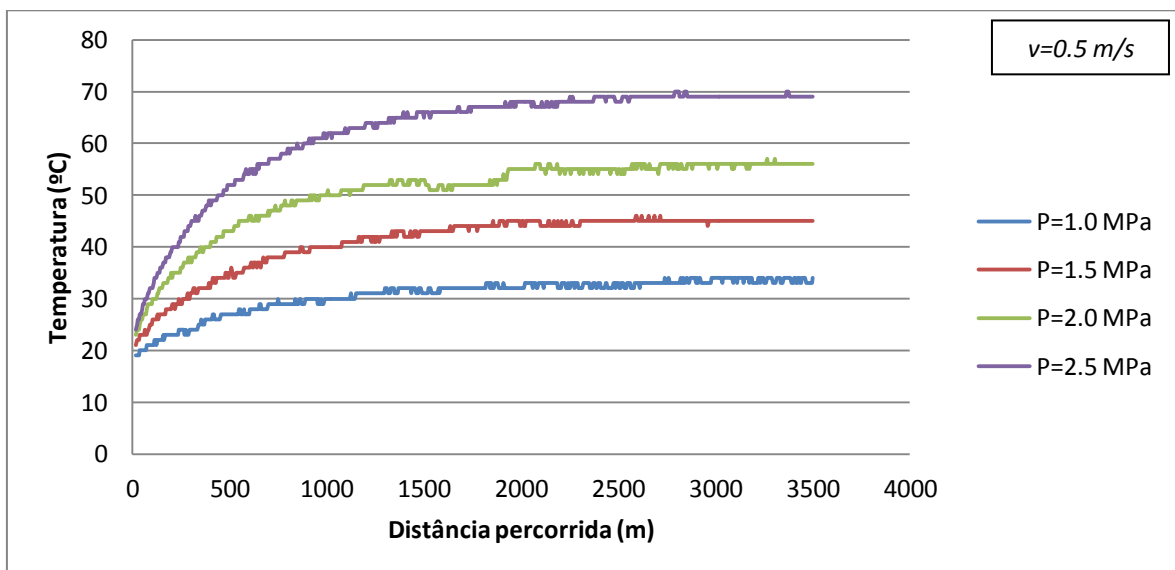


Figura 4.8 – Evolução da temperatura medida no disco, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.

Na figura 4.9 podem observar-se os valores do coeficiente de desgaste, obtidos para o HMWPE, ensaiado a diferentes pressões de contacto. Verifica-se que o aumento da pressão de contacto resulta num aumento do coeficiente de desgaste.

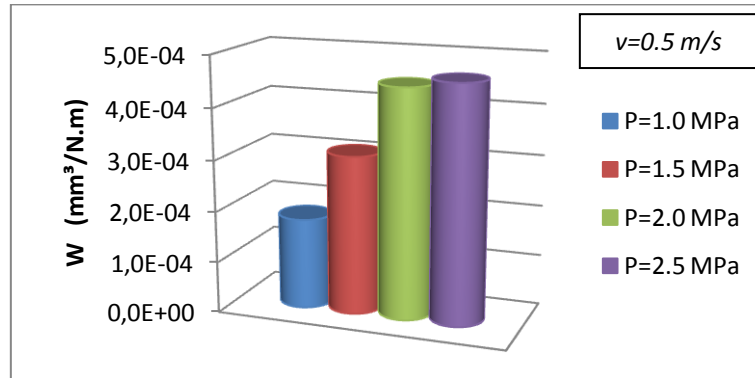


Figura 4.9 – Coeficiente de desgaste para o HMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.

Na tabela 4.4 são apresentados os resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , para os ensaios efetuados ao HMWPE com diferentes pressões de contacto, mantendo a velocidade de deslizamento constante (0.5m/s) e após uma distância de deslizamento de 3500m.

Tabela 4.4 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o HMWPE em estudo, nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.

Condições Pv	μ	T_f [°C]	W [mm³/(N.m)]
<i>P=1.0MPa, v=0.5m/s</i>	0.25	34	1.78×10^{-4}
<i>P=1.5MPa, v=0.5m/s</i>	0.26	45	3.10×10^{-4}
<i>P=2.0MPa, v=0.5m/s</i>	0.27	56	4.48×10^{-4}
<i>P=2.5MPa, v=0.5m/s</i>	0.28	69	4.62×10^{-4}

Analisando a tabela 4.4 verifica-se que apesar do aumento do coeficiente de atrito com o aumento da pressão de contacto, este aumento não é muito significativo. Também verifica-se que o coeficiente de desgaste aumenta com o aumento da pressão de contacto, sendo este aumento bastante significativo comparativamente ao aumento do coeficiente de atrito pois o coeficiente de desgaste aumenta 2.6 vezes entre uma pressão de contacto de 1MPa e uma de 2.5MPa. Analisando a temperatura final dos ensaios verifica-se que a temperatura aumenta com o aumento da pressão de contacto.

4.2.2. Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do HMWPE a diferentes pressões de contacto

Na figura 4.10 podem observar-se as imagens da superfície dos discos, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, nos ensaios realizados ao HMWPE com diferentes pressões de contacto. Verifica-se que em todos os ensaios houve adesão do material ao disco mas em nenhum dos casos se dá uma formação estável de um tribofilme. Apenas ocorre deposição de material, sobre a superfície dos discos, na direção perpendicular da rugosidade dos discos em relação à direção de deslizamento. Na direção paralela não é visível a ocorrência deposição de material sobre a superfície dos discos. Ainda assim observa-se um aumento de adesão de material ao disco com o aumento da pressão de contacto pelo que o mecanismo predominante de desgaste é a adesão. O ensaio que apresenta menor adesão de material no disco é o de $Pv=0.5\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ ($P=1\text{MPa}$), figura 4.10a, e o que apresenta maior adesão de material no disco é o de $Pv=1.25\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ ($P=2.5\text{MPa}$), figura 4.10d.

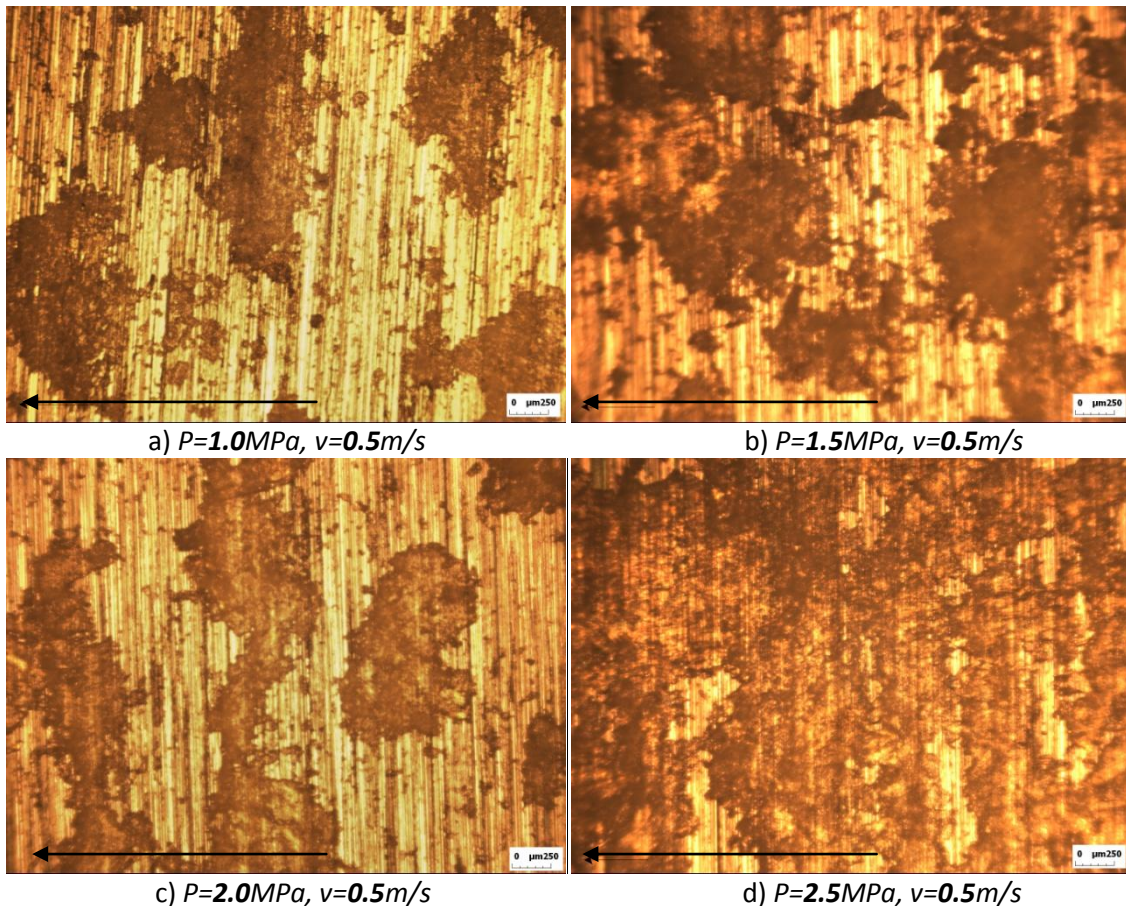


Figura 4.10 – Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE com diferentes pressões de contacto.

Na figura 4.11 podem observar-se imagens da superfície dos materiais, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, nos ensaios realizados com o HMWPE

a diferentes pressões de contacto. Verifica-se que o aumento da pressão de contacto provoca um amolecimento da superfície e respetiva deformação. Tal factor é explicado pela temperatura atingida no ensaio, que sendo superior à temperatura de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (44°C) vai provocar o amolecimento e deformação da superfície. Pode dizer-se que para uma pressão de contacto de 1MPa, figura 4.11a, a deformação não é tão saliente como nos restantes ensaios, sendo que é visível o aumento da deformação com o aumento da pressão de contacto. Assim se pode concluir que o principal mecanismo de desgaste é a abrasão, visível na formação de estrias.

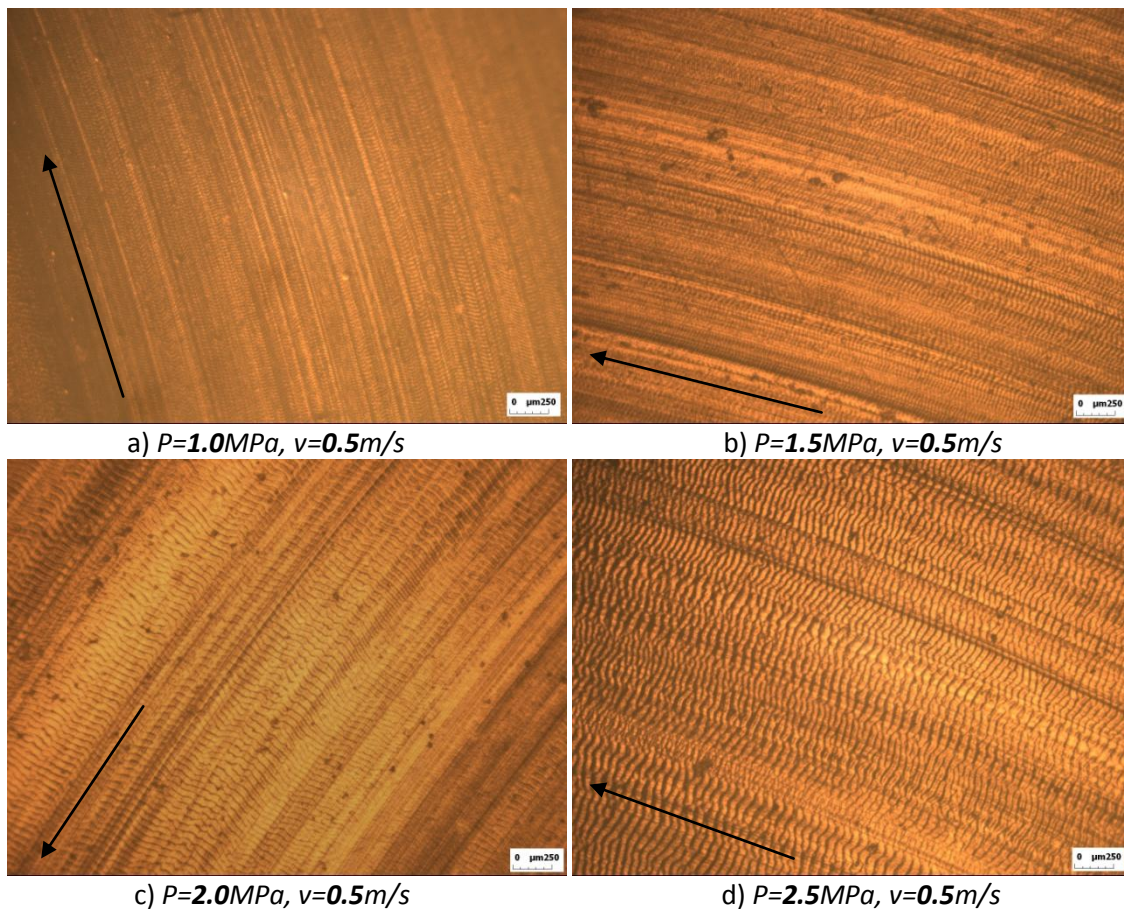


Figura 4.11 – *Imagens da superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE com diferentes pressões de contacto.*

4.2.3. Influência da pressão de contacto no comportamento tribológico do UHMWPE

Na figura 4.12 pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, obtida nos ensaios realizados ao UHMWPE com diferentes pressões de contacto.

Analisando os resultados verifica-se que o coeficiente de atrito aumenta com o aumento da pressão de contacto. Para os ensaios com factores Pv superiores

Comportamento Tribológico de Polietilenos

($Pv=1.25\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ e $Pv=1.5\text{MPa}\cdot\text{m/s}$), o comportamento do coeficiente de atrito sugere que ocorreu deformação do material e correspondente aumento da área real de contacto durante o ensaio, visível na figura 4.14. Na figura 4.13 pode observar-se a evolução da temperatura na aresta da superfície do disco, para o ensaio do UHMWPE, em função da distância de deslizamento para quatro diferentes pressões de contacto. Pode observar-se que a temperatura aumenta com o aumento da pressão de contacto. Também se verifica que o aumento de temperatura apresenta uma tendência semelhante, para todos os casos. Na figura 4.14 é visível o aumento do bordo de ataque da amostra com o aumento da pressão de contacto.

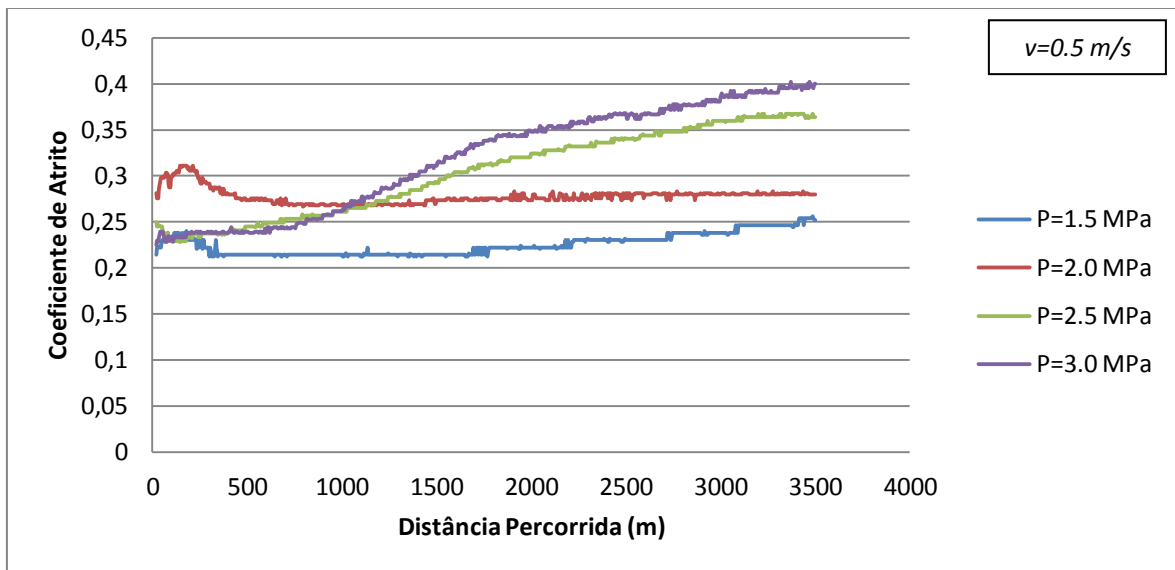


Figura 4.12 – Evolução do coeficiente de atrito, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.

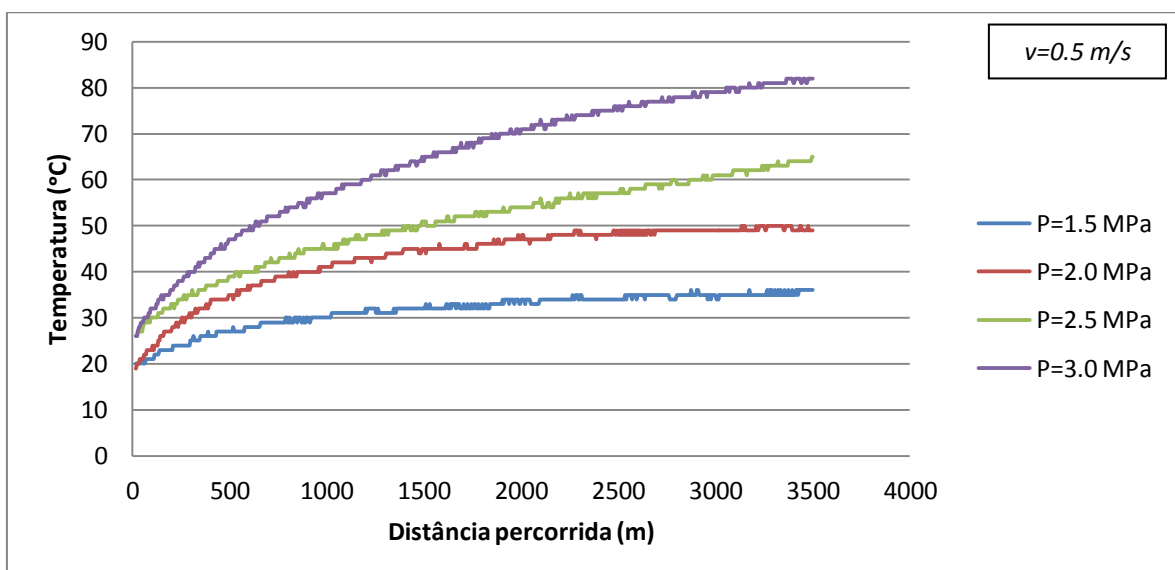


Figura 4.13 – Evolução da temperatura medida no disco, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.

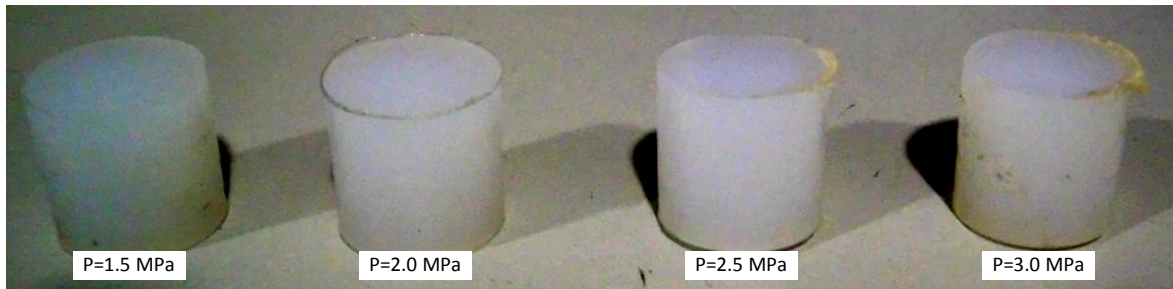


Figura 4.14 – Evolução do bordo de ataque do UHMWPE para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.

Na figura 4.15 podem observar-se os valores do coeficiente de desgaste, obtidos para o UHMWPE, ensaiado a diferentes pressões de contacto. Verifica-se que o aumento da pressão de contacto resulta num aumento significativo do coeficiente de desgaste.

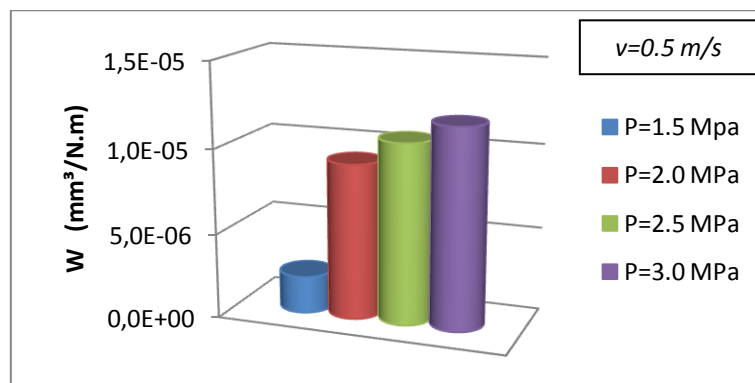


Figura 4.15 – Coeficiente de desgaste para o UHMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.

Na tabela 4.5 são apresentados os resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , para os ensaios efetuados ao UHMWPE com diferentes pressões de contacto, mantendo a velocidade de deslizamento constante (0.5m/s) e após uma distância de deslizamento de 3500m.

Tabela 4.5 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o UHMWPE em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.3.

Condições Pv	μ	T_f [°C]	W [mm³/(N.m)]
<i>P=1.5MPa, v=0.5m/s</i>	0.25	36	2.19×10^{-6}
<i>P=2.0MPa, v=0.5m/s</i>	0.28	49	9.18×10^{-6}
<i>P=2.5MPa, v=0.5m/s</i>	0.36	65	1.06×10^{-5}
<i>P=3.0MPa, v=0.5m/s</i>	0.40	82	1.18×10^{-5}

Analisando a tabela 4.5 verifica-se que o aumento da pressão de contacto resulta num aumento do coeficiente de atrito. Também verifica-se que o coeficiente de desgaste aumenta com o aumento da pressão de contacto. Analisando a temperatura final dos ensaios verifica-se que o aumento da pressão promove um aumento da temperatura final. Logo é expectável que haja alterações nos mecanismos de atrito e desgaste com o aumento da pressão de contacto, principalmente devido ao aumento da temperatura.

4.2.4. Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do UHMWPE a diferentes pressões de contacto

Na figura 4.16 podem observar-se as imagens da superfície dos discos, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, dos ensaios realizados ao UHMWPE com diferentes pressões de contacto. Verifica-se que praticamente não se dá adesão visível de material à superfície do disco.

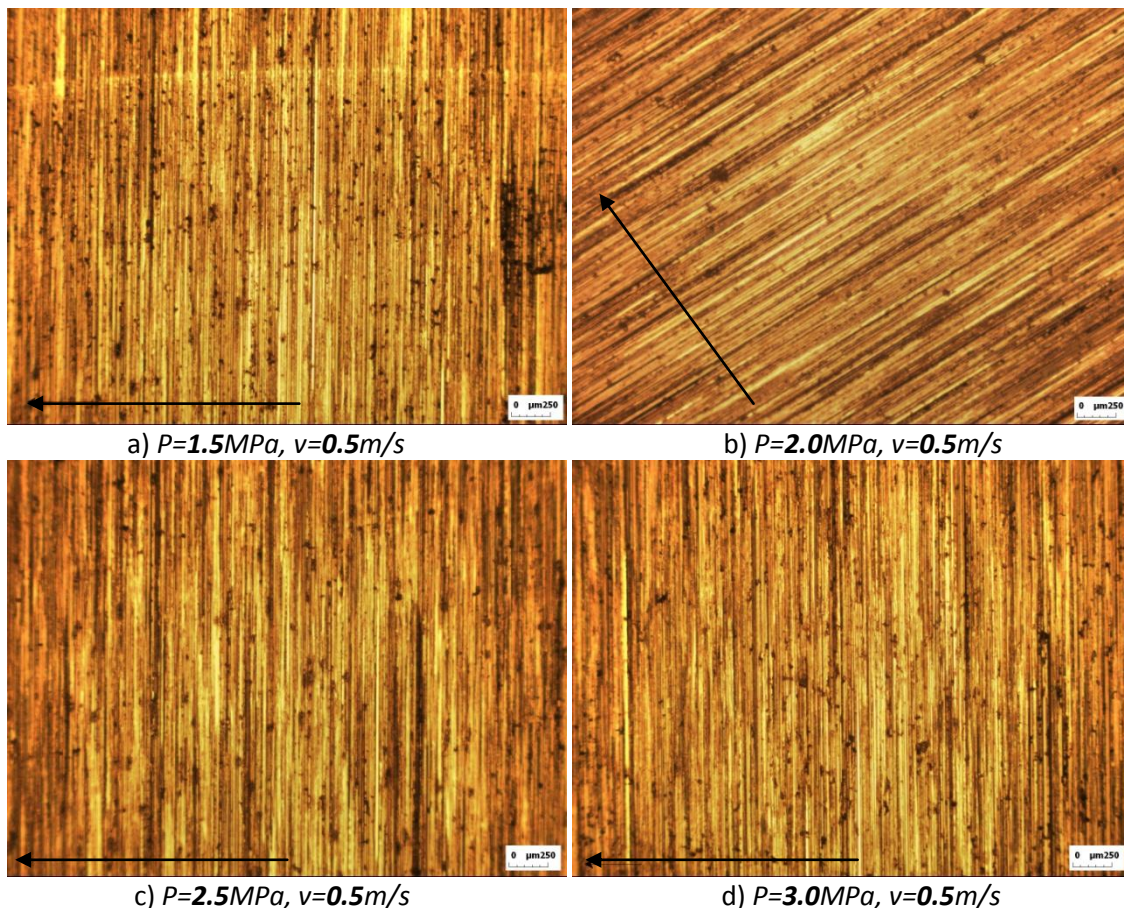


Figura 4.16 – *Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do UHMWPE com diferentes pressões de contacto.*

Na figura 4.17 podem observar-se imagens da superfície dos materiais, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, nos ensaios realizados ao UHMWPE

com diferentes pressões de contacto. Verifica-se que o aumento da pressão de contacto provoca um amolecimento da superfície e respetiva deformação. É visível que para uma pressão de contacto de 1.5MPa ($Pv=0.75MPa.m/s$), figura 4.17a, não ocorre deformação acentuada no material, sendo ainda visível as marcas de corte do material. Para uma pressão de 2MPa, figura 4.17b, verifica-se o aumento do desgaste visível à superfície acompanhado da deformação do material. Para as pressões superiores, figura 4.17c e 4.17d, observa-se o aumento contínuo da deformação do material causada pelo aumento da temperatura com o aumento da pressão de contacto, resultando em coeficientes de atrito e de desgaste superiores. Em todos os casos ocorre abrasão do material, bastante acentuada com o aumento da pressão de contacto.

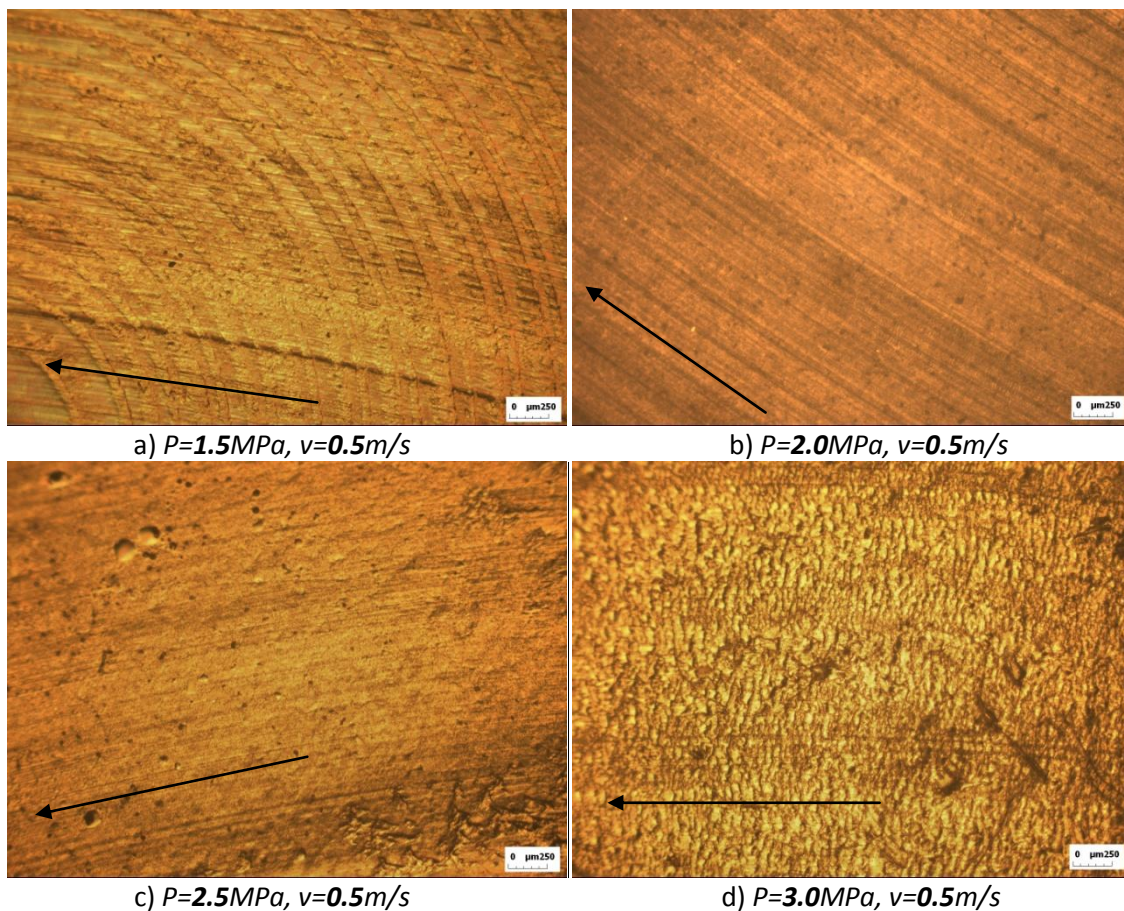


Figura 4.17 – Imagens da superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com *ampliação* 50x, após ensaios do UHMWPE com diferentes pressões de contacto.

4.3. Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico de polietilenos

Para compreender a influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico de polietilenos foram realizados ensaios com diferentes velocidade de

deslizamento. Como o HMWPE tem um coeficiente de desgaste elevado optou-se por uma pressão mais baixa (1MPa) em relação ao UHMWPE, que tem um coeficiente de desgaste muito baixo, optando-se por uma pressão mais elevada (2MPa) fazendo depois variar a velocidade de deslizamento.

Na tabela 4.6 estão apresentadas as condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento utilizadas nos ensaios para o HMWPE. Na tabela 4.7 estão apresentadas as condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento utilizadas nos ensaios para o UHMWPE.

Tabela 4.6 – Condições utilizadas nos ensaios para o HMWPE para 3500m.

Parâmetros	Pv=0.5 [MPa.m/s]	Pv=0.75 [MPa.m/s]	Pv=1 [MPa.m/s]	Pv=1.25 [MPa.m/s]
<i>Pressão de contacto [MPa]</i>	1	1	1	1
<i>Velocidade de deslizamento [m/s]</i>	0.50	0.75	1	1.25

Tabela 4.7 – Condições utilizadas nos ensaios para o UHMWPE para 3500m.

Parâmetros	Pv=1 [MPa.m/s]	Pv=1.5 [MPa.m/s]	Pv=2 [MPa.m/s]	Pv=2.5 [MPa.m/s]
<i>Pressão de contacto [MPa]</i>	2	2	2	2
<i>Velocidade de deslizamento [m/s]</i>	0.5	0.75	1	1.25

4.3.1. Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico do HMWPE

Na figura 4.18 pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, obtida nos ensaios realizados ao HMWPE para diferentes velocidades de deslizamento.

Analisando os resultados verifica-se que o coeficiente de atrito tende a aumentar com o aumento da velocidade de deslizamento contudo observa-se que a variação do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade de deslizamento não é muito significativa no comportamento ao atrito.

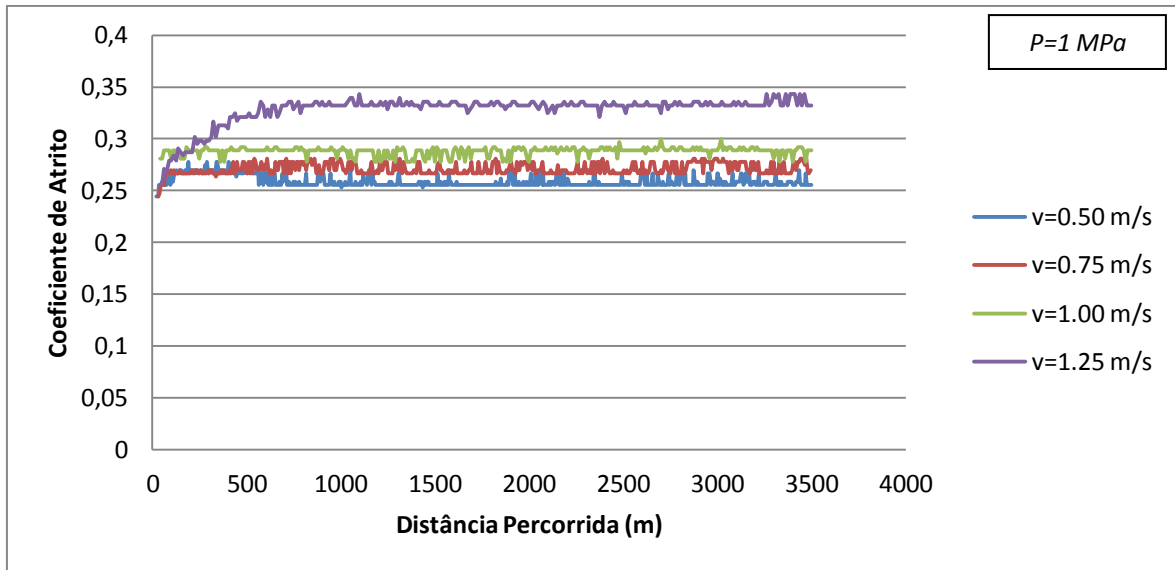


Figura 4.18 – Evolução do coeficiente de atrito, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.6.

Na figura 4.19 pode observar-se a evolução da temperatura na aresta da superfície do disco, para o ensaio do HMWPE em função da distância de deslizamento para quatro diferentes velocidades de deslizamento. Verifica-se que existe uma tendência para a temperatura aumentar com o aumento da velocidade de deslizamento. Também se verifica que o aumento de temperatura apresenta uma evolução semelhante para todos os casos, até começar a estabilizar em redor de uma temperatura final.

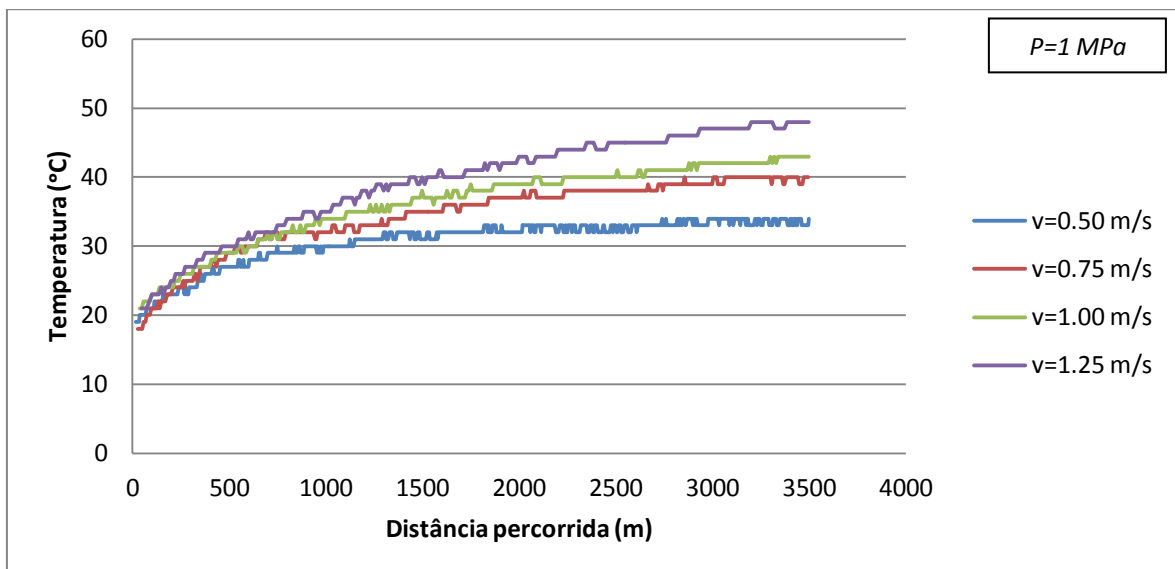


Figura 4.19 – Evolução da temperatura medida no disco, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.6.

Na figura 4.20 podem observar-se os valores do coeficiente de desgaste, obtidos para o HMWPE, ensaiado a diferentes velocidades de deslizamento. Verifica-se que o coeficiente de desgaste apresenta um aumento acentuado com o aumento da velocidade de deslizamento. O ensaio de deslizamento a 1.25m/s ($P_v=1.25\text{MPa}\cdot\text{m/s}$) apresenta um coeficiente de desgaste bastante superior aos outros ensaios, ou seja nessa gama de velocidades de deslizamento a resistência ao desgaste deste material é muito sensível a variações de velocidade.

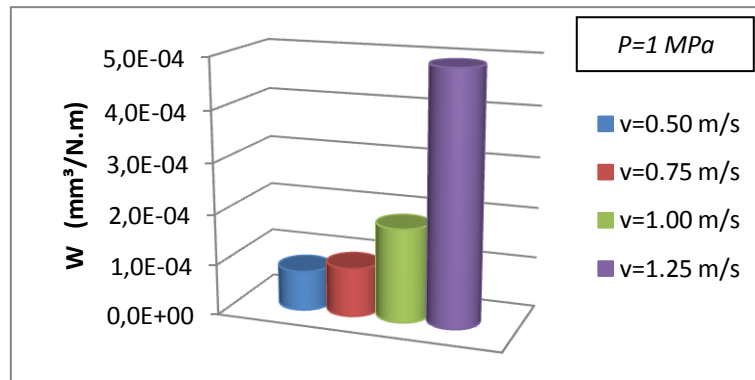


Figura 4.20 – Coeficiente de desgaste para o HMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.6.

Na tabela 4.8 são apresentados os resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , para os ensaios efetuados ao HMWPE para diferentes velocidade de deslizamento, mantendo a pressão de contacto constante (1MPa) e após uma distância de deslizamento de 3500m.

Tabela 4.8 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o HMWPE em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.6.

Condições P_v	μ	T_f [°C]	W [$\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$]
$P=1\text{MPa}$, $v=0.50\text{m/s}$	0.25	34	7.82×10^{-5}
$P=1\text{MPa}$, $v=0.75\text{m/s}$	0.27	41	9.53×10^{-5}
$P=1\text{MPa}$, $v=1.00\text{m/s}$	0.29	43	1.84×10^{-4}
$P=1\text{MPa}$, $v=1.25\text{m/s}$	0.33	48	4.92×10^{-4}

Analisando a tabela 4.8 verifica-se que apesar do aumento do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade de deslizamento, este aumento não aparenta ser muito significativo. Também se verifica que o coeficiente de desgaste aumenta com o aumento da velocidade de deslizamento, sendo que para uma velocidade de 1.25m/s o desgaste é bastante superior aos outros ensaios. A temperatura também aumenta com o aumento da velocidade de deslizamento, na gama de valores testados.

4.3.2. Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do HMWPE a diferentes velocidades de deslizamento

Na figura 4.21 podem observar-se as imagens da superfície dos discos, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, dos ensaios realizados ao HMWPE com diferentes velocidades de deslizamento. Verifica-se que em todos os ensaios houve adesão do material ao disco mas em nenhum dos casos se dá uma formação estável de um tribofilme. Apenas existe a ocorrência de deposição de material, sobre a superfície dos discos, na direção perpendicular da rugosidade dos discos em relação à direção de deslizamento. Ainda assim observa-se um aumento de adesão de material ao disco com o aumento da velocidade de deslizamento pelo que o mecanismo predominante de desgaste é a adesão. O ensaio que apresenta menor adesão de material no disco é o de $Pv=0.5\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ ($v=0.5\text{m/s}$), figura 4.21a, e o que apresenta maior adesão de material no disco é o de $Pv=1.25\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ ($v=1.25\text{m/s}$), figura 4.21d.

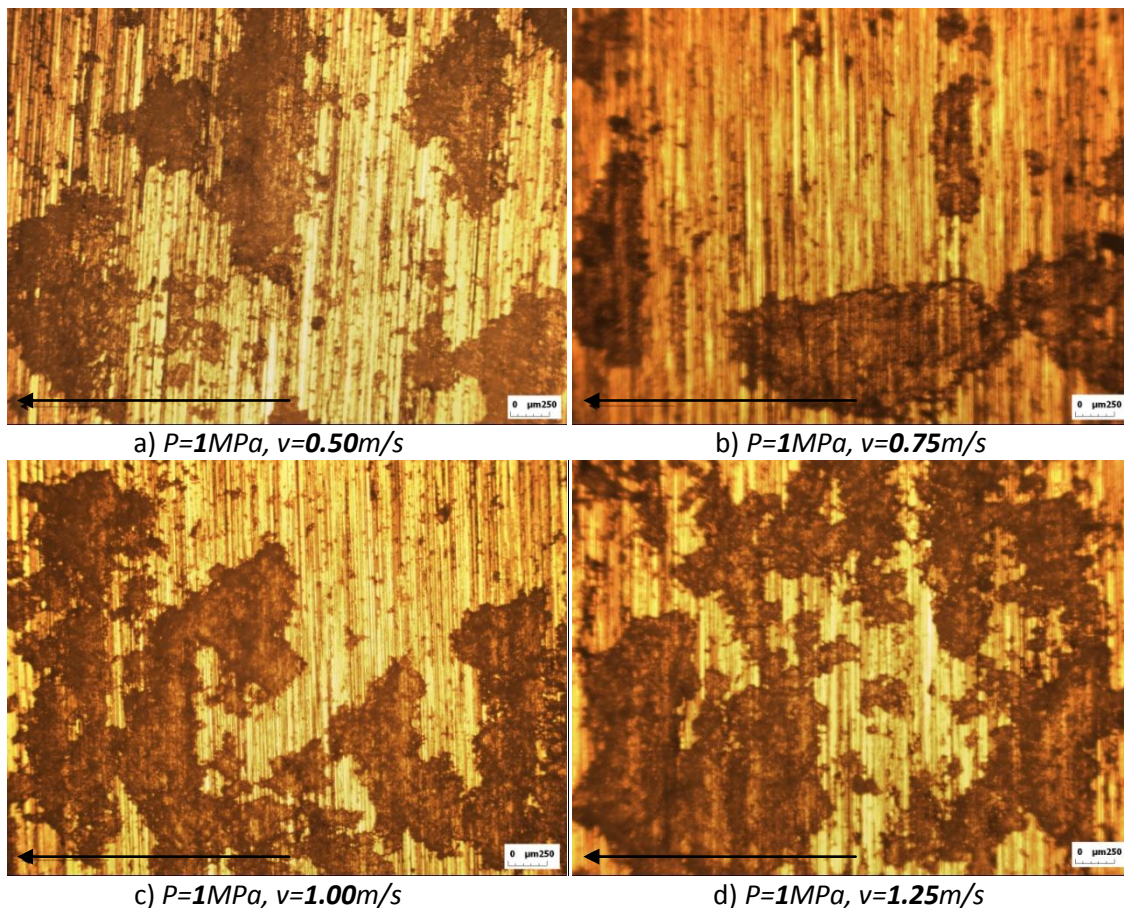


Figura 4.21 – Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE com diferentes velocidades de deslizamento.

Na figura 4.22 podem observar-se imagens da superfícies dos materiais, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, nos ensaios realizados ao HMWPE com

diferentes velocidades de deslizamento. Verifica-se que em todos os casos se dá abrasão do material mas apenas para a velocidade mais alta (1.25m/s), figura 4.22d, mostra sinais mais visíveis de amolecimento da superfície (estrias pronunciadas), pelo que se conclui que a temperatura atingida foi suficiente para dar início à deformação da superfície.

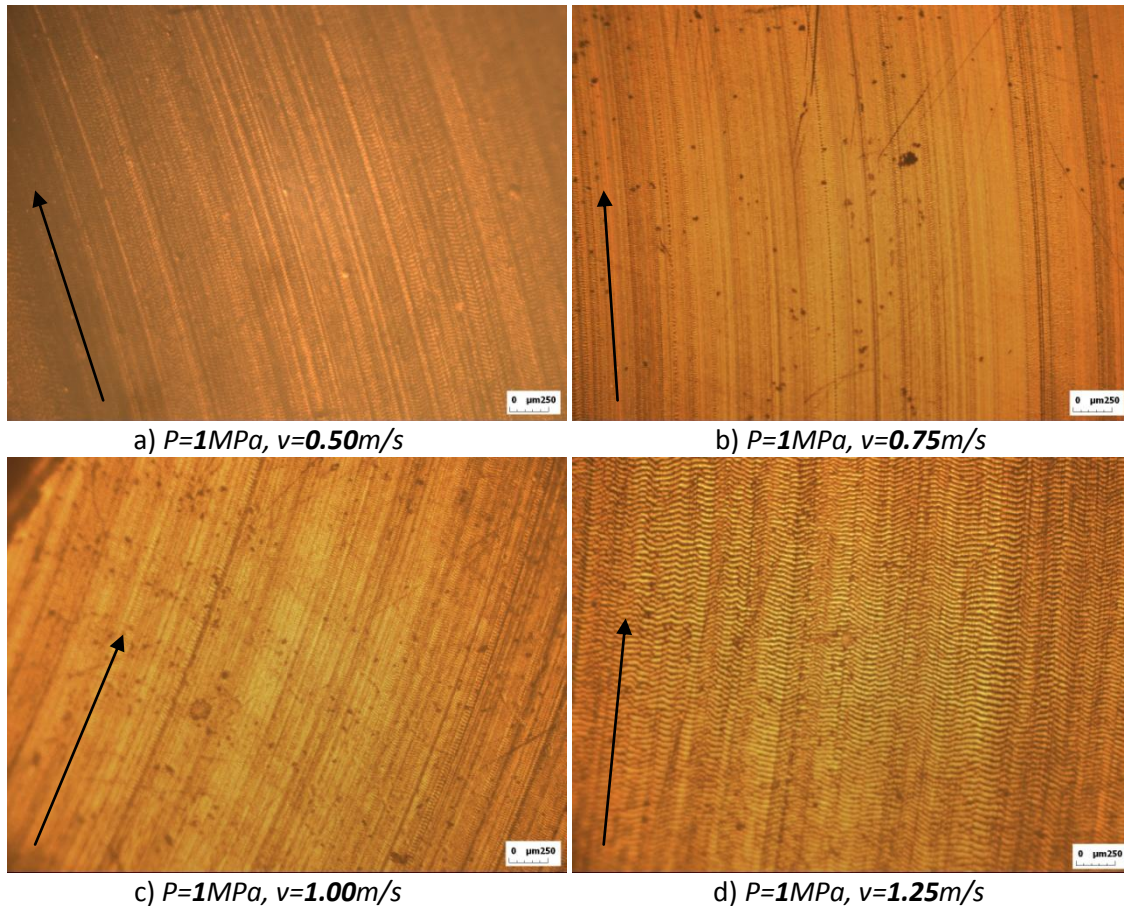


Figura 4.22 – *Imagens das superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE com diferentes velocidades de deslizamento.*

4.3.3. Influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico do UHMWPE

Na figura 4.23 pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, obtida nos ensaios realizados ao UHMWPE com variação da velocidade de deslizamento.

Analisando os resultados verifica-se que para velocidades superiores a 0.5m/s, caso dos três ensaios a velocidades elevadas, o coeficiente de atrito diminui com o aumento da velocidade de deslizamento ao fim de uma distância percorrida de 3500 metros. Também se observa que o aumento da velocidade origina um pico do coeficiente de atrito para uma distância percorrida mais curta sendo que depois diminui. O

Comportamento Tribológico de Polietilenos

comportamento do coeficiente de atrito nos três ensaios realizados com velocidades superiores (0.75, 1 e 1.25m/s) sugere que houve inicialmente uma deformação do material, causada pelo aumento da temperatura, que resultou num bordo de ataque, devido ao amaciamento e eventual fusão parcial do polímero, assim explicando o aumento do coeficiente de atrito. Na figura 4.24 é visível algum material que foi-se desintegrando da amostra e que ao longo do escorregamento foi aderindo novamente à amostra, dando-se assim a formação do bordo de ataque. Este bordo de ataque é maior consoante o aumento da velocidade de deslizamento.

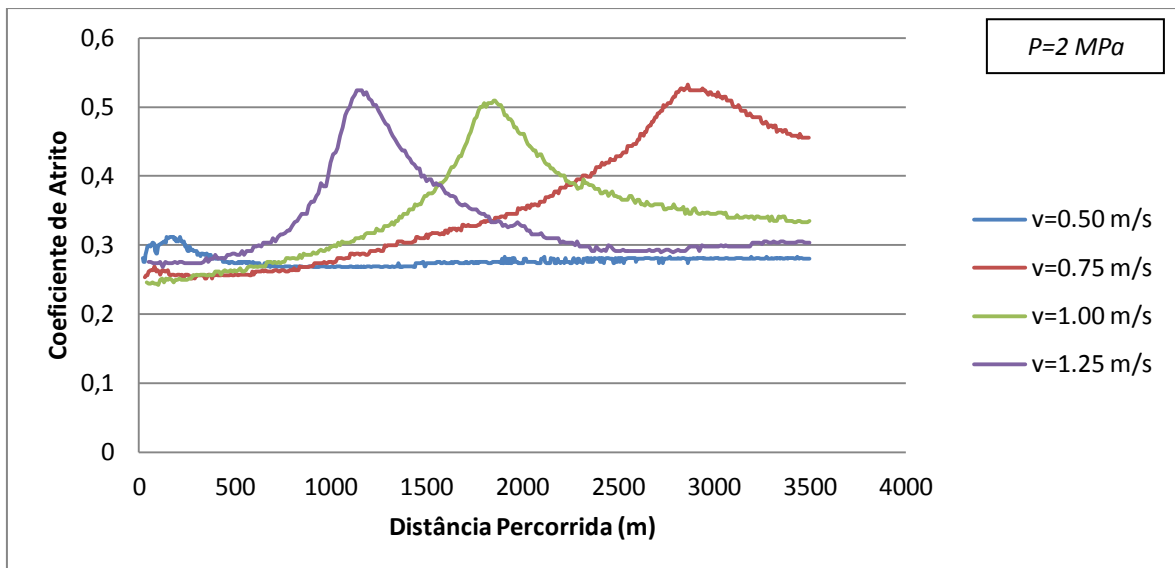


Figura 4.23 – Evolução do coeficiente de atrito, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.7.

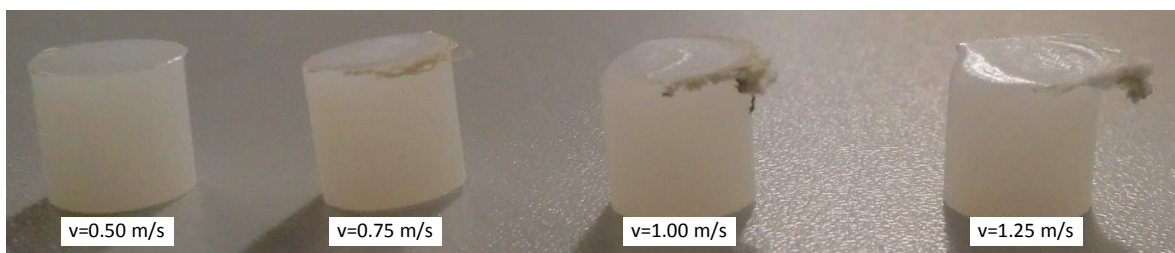


Figura 4.24 – Evolução do bordo de ataque do UHMWPE para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.7.

Na figura 4.25 pode observar-se a evolução da temperatura na aresta da superfície do disco, para o ensaio do UHMWPE em função da distância de deslizamento para quatro diferentes velocidades de deslizamento. Verifica-se que a temperatura aumenta com o aumento da velocidade de deslizamento. Em todos os ensaios realizados a temperatura final passou a temperatura de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (42°C), sendo que no ensaio da velocidade a 0.5m/s a temperatura final não é muito superior à

temperatura de deformação sob carga sugerida pelo fabricante. Este facto explica a existência de deformação da superfície do material nos ensaios com velocidades de deslizamento superiores a 0.5m/s.

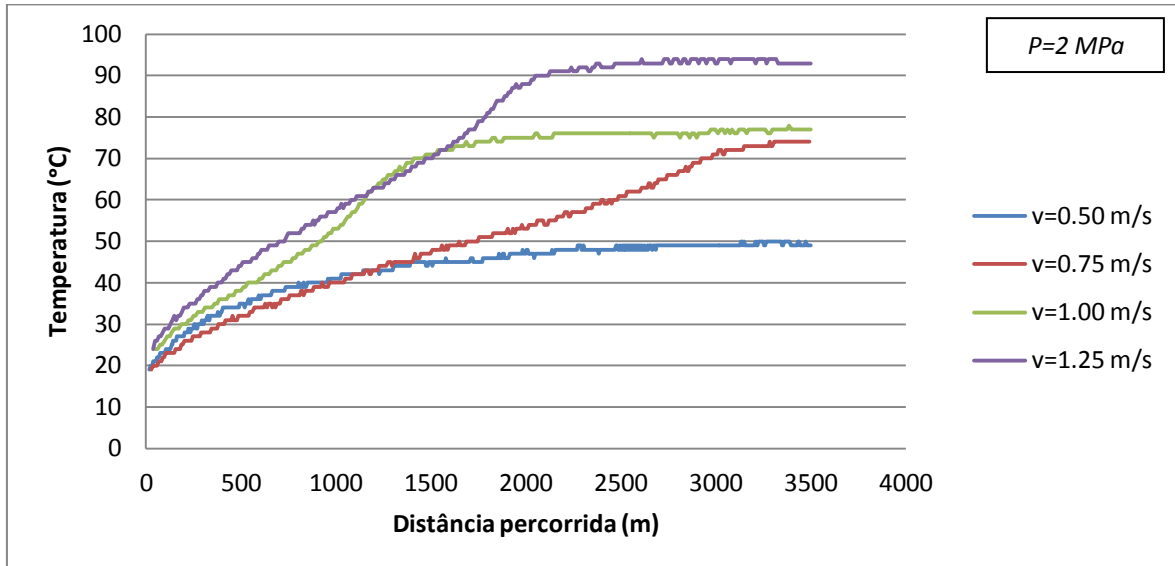


Figura 4.25 – Evolução da temperatura medida no disco, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.7.

Na figura 4.26 podem observar-se os valores do coeficiente de desgaste, obtidos para o UHMWPE, ensaiado a diferentes velocidades de deslizamento. Verifica-se que o aumento da velocidade de deslizamento resulta num aumento do coeficiente de desgaste.

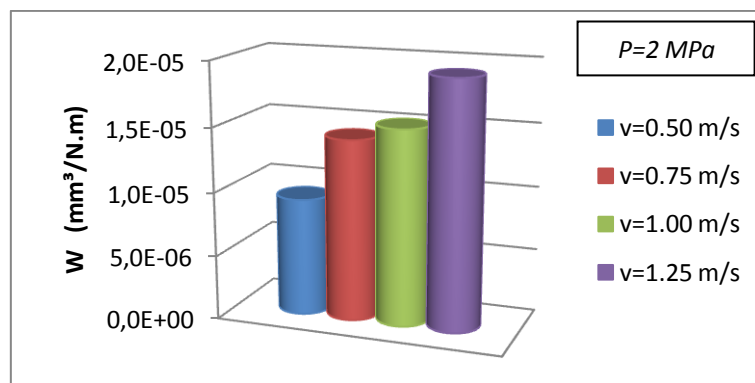


Figura 4.26 – Coeficiente de desgaste para o UHMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.7.

Na tabela 4.9 são apresentados os resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , para os ensaios efetuados ao UHMWPE com diferentes velocidades de deslizamento, mantendo a pressão de contacto constante (2MPa) e após uma distância de deslizamento de 3500m.

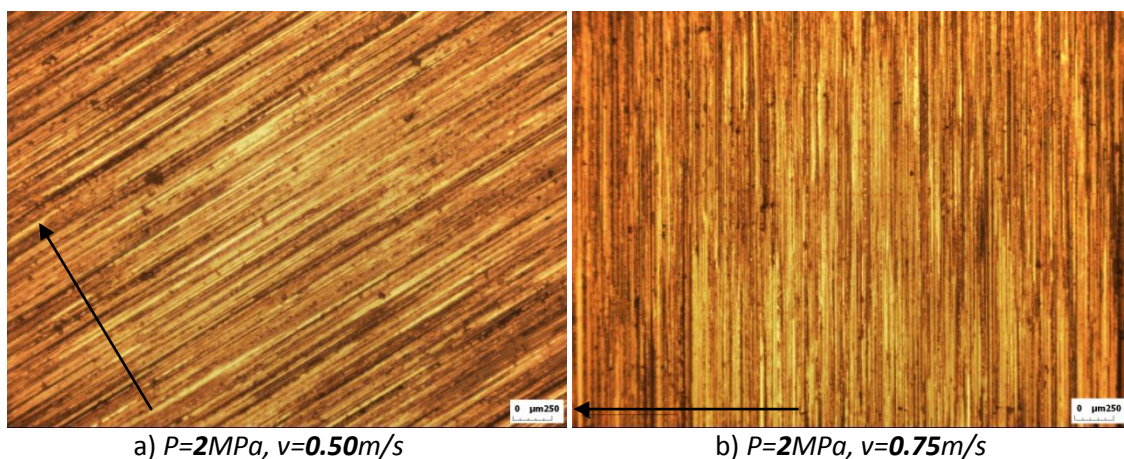
Tabela 4.9 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o UHMWPE em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.7.

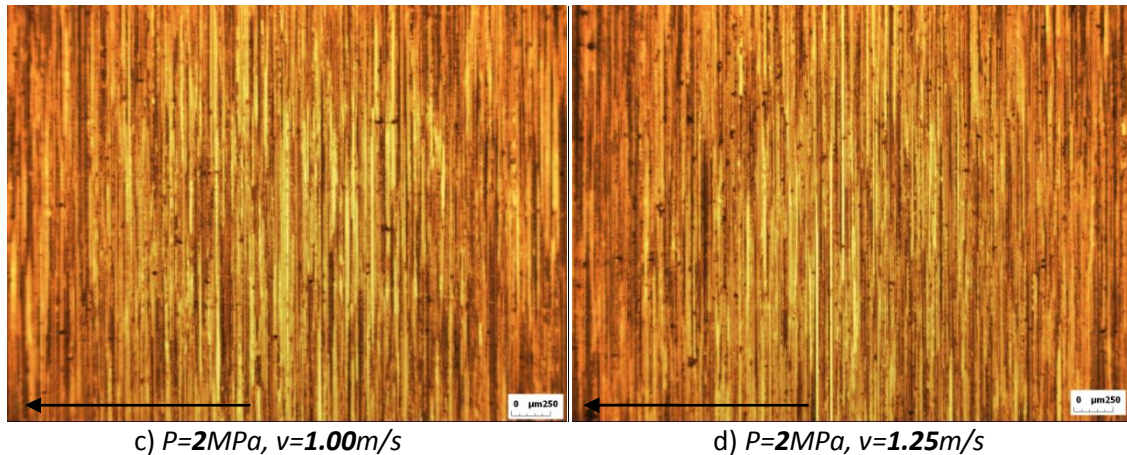
Condições Pv	μ	T_f [°C]	W [mm³/(N.m)]
$P=2\text{MPa}$, $v=0.50\text{m/s}$	0.28	49	9.18×10^{-6}
$P=2\text{MPa}$, $v=0.75\text{m/s}$	0.46	74	1.41×10^{-5}
$P=2\text{MPa}$, $v=1.00\text{m/s}$	0.34	77	1.53×10^{-5}
$P=2\text{MPa}$, $v=1.25\text{m/s}$	0.30	93	1.92×10^{-5}

Analisando a tabela 4.9 verifica-se que para velocidades superiores a 0.5m/s (Pv superior a 1MPa.m/s) o aumento da velocidade de deslizamento resulta numa diminuição do coeficiente de atrito. Também se verifica que o coeficiente de desgaste aumenta com o aumento da velocidade de deslizamento. Analisando a temperatura final dos ensaios verifica-se que a velocidade de deslizamento influencia o aumento da temperatura durante os ensaios ao UHMWPE.

4.3.4. Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do UHMWPE a diferentes velocidades de deslizamento

Na figura 4.27 podem observar-se as imagens da superfície dos discos, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, dos ensaios realizados ao UHMWPE com diferentes velocidades de deslizamento. Verifica-se que praticamente não se dá adesão de material à superfície do disco.



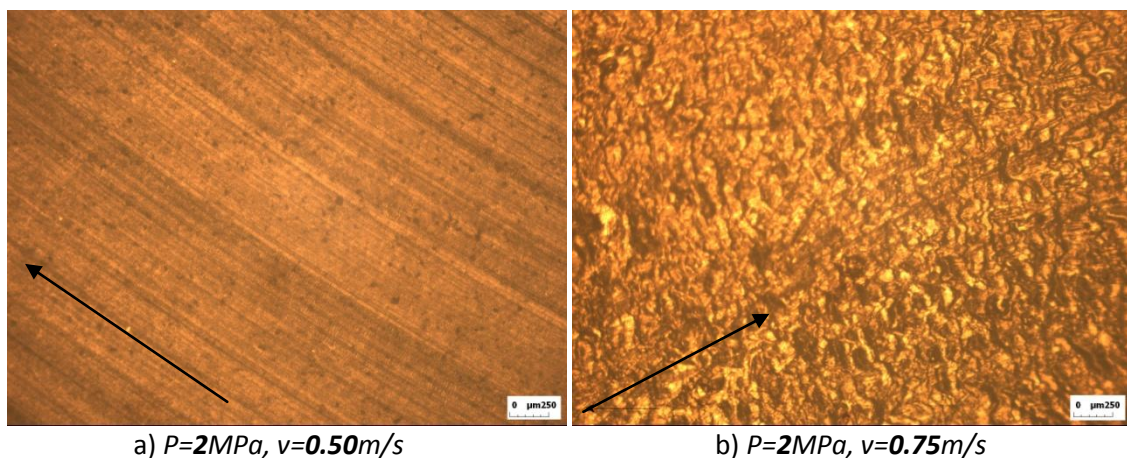


c) $P=2\text{MPa}$, $v=1.00\text{m/s}$

d) $P=2\text{MPa}$, $v=1.25\text{m/s}$

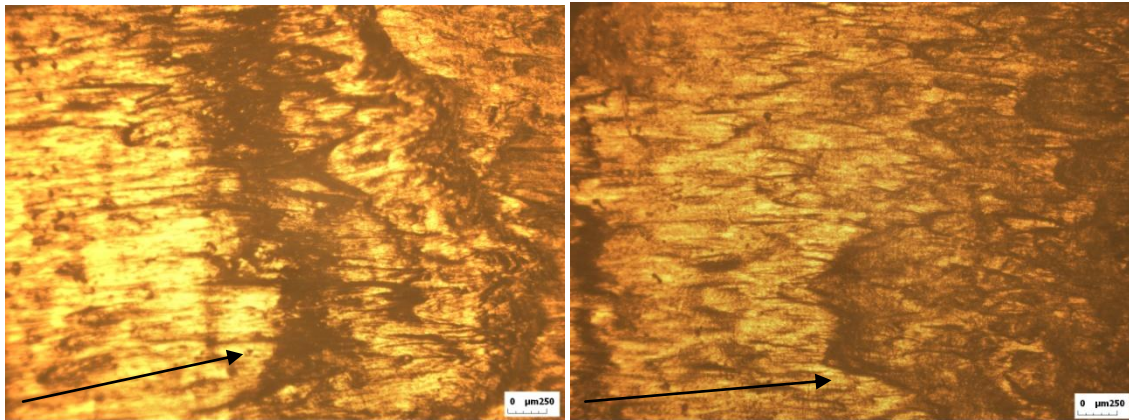
Figura 4.27 – Imagens das superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do UHMWPE com diferentes velocidades de deslizamento.

Na figura 4.28 podem observar-se imagens das superfícies dos materiais, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, nos ensaios realizados ao UHMWPE com diferentes velocidades de deslizamento. Verifica-se que o aumento da velocidade de deslizamento provocou um amolecimento da superfície e respetiva deformação. Tal factor é explicado pela temperatura atingida no ensaio, que sendo superior à temperatura de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (42°C) vai provocar o amolecimento e deformação da superfície. É visível que para uma velocidade de deslizamento de 0.5m/s , figura 4.28a, a abrasão é menos pronunciada. Para os ensaios restantes, a velocidades superiores, figura 4.28b, figura 4.28c e figura 4.28d, observa-se a crescente deformação do material causada pelo aumento da temperatura, sendo que a deformação plástica é mais acentuada no sentido da força de atrito (figura 4.28c e 4.28d). Assim se pode concluir que o principal mecanismo de desgaste nas amostras é a abrasão.



a) $P=2\text{MPa}$, $v=0.50\text{m/s}$

b) $P=2\text{MPa}$, $v=0.75\text{m/s}$



c) $P=2\text{MPa}$, $v=1.00\text{m/s}$

d) $P=2\text{MPa}$, $v=1.25\text{m/s}$

Figura 4.28 – Imagens da superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do UHMWPE com diferentes velocidades de deslizamento.

4.4. Comportamento tribológico de polietilenos em meio aquoso

Para compreender o comportamento tribológico do HMWPE e do UHMWPE num meio aquoso realizaram-se ensaios com água destilada. Na tabela 4.10 estão apresentadas as condições de pressão de contacto e velocidade de deslizamento utilizadas nos ensaios para o HMWPE e para o UHMWPE.

Tabela 4.10 – Condições utilizadas nos ensaios a seco e em meio aquoso para 3500m.

Parâmetros	Seco $Pv=1$ [MPa.m/s]	Meio aquoso $Pv=1$ [MPa.m/s]
Pressão de contacto [MPa]	2	2
Velocidade de deslizamento [m/s]	0.50	0.50

4.4.1. Estudo do comportamento tribológico do HMWPE em meio aquoso

Na figura 4.29 pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, obtida nos ensaios realizados ao HMWPE para diferentes meios envolventes (seco e meio aquoso). O comportamento do HMWPE, perante um ensaio em meio aquoso, mostra um coeficiente de atrito inferior ao comportamento do HMWPE perante um ensaio a seco. O HMWPE tem uma taxa de absorção de água muito baixa (0.01%), pelo que, as suas propriedades físicas e mecânicas não ficam comprometidas quando o material está envolvido num meio aquoso. Como o HMWPE

apresenta boas propriedades auto-lubrificantes e um coeficiente de atrito baixo pode explicar o facto de quando imerso em água o comportamento do HMWPE não é muito afectado.

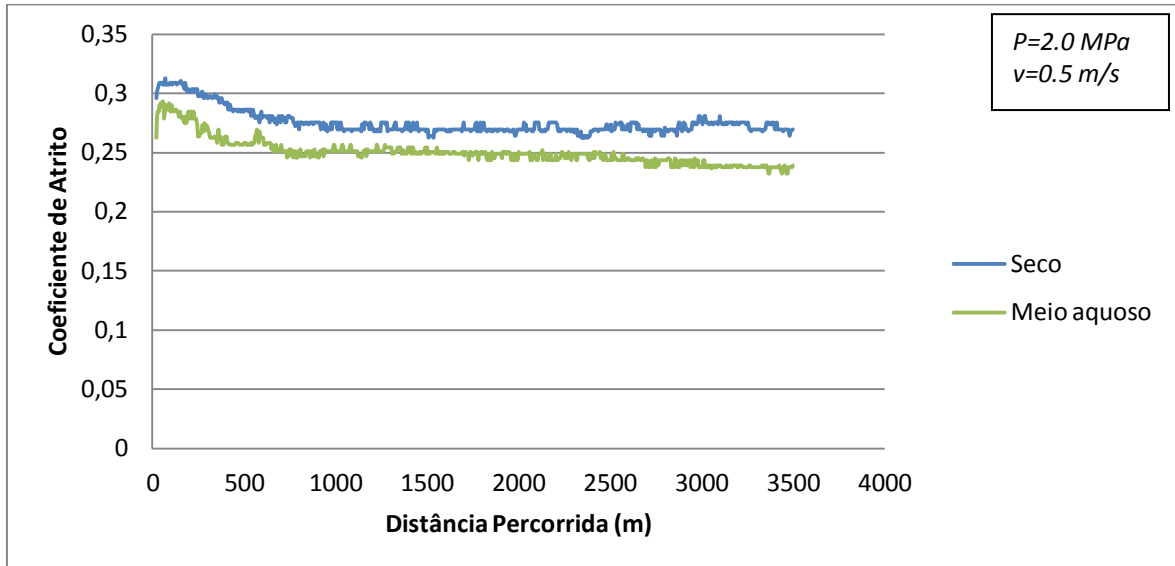


Figura 4.29 – Evolução do coeficiente de atrito, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.

Na figura 4.30 pode observar-se a evolução da temperatura na aresta da superfície do disco, para o ensaio do HMWPE, em função da distância de deslizamento obtidos no ensaio a seco e no ensaio em meio aquoso. Verifica-se que a água, utilizada como lubrificante, tem um grande poder refrigerante pois existe uma grande redução de temperatura entre um ensaio a seco e um em meio aquoso.

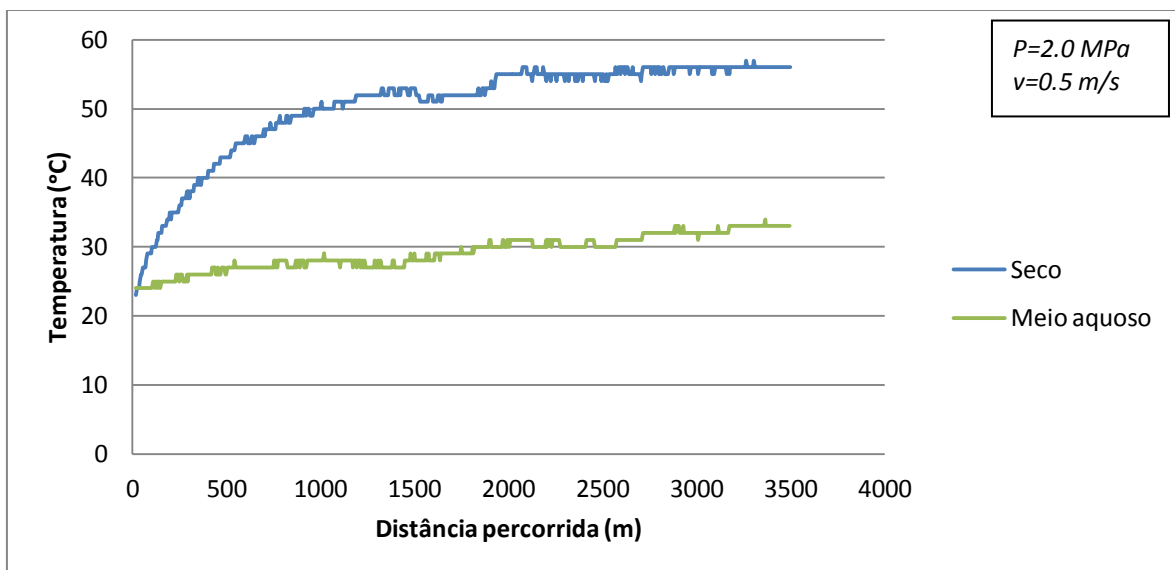


Figura 4.30 – Evolução da temperatura medida no disco, para o HMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.

Comportamento Tribológico de Polietilenos

Na figura 4.31 podem observar-se os valores do coeficiente de desgaste do UHMWPE, obtidos no ensaio a seco e no ensaio em meio aquoso. Verifica-se que a introdução de um lubrificante, neste caso água, reduz bastante o coeficiente de desgaste.

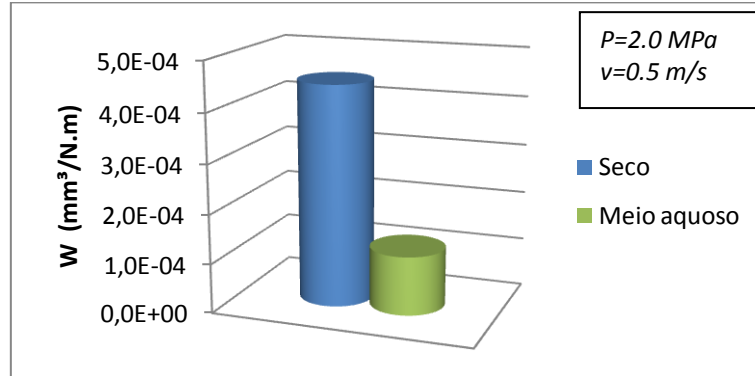


Figura 4.31 – Coeficiente de desgaste para o HMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.

Na tabela 4.11 são apresentados os resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , para os ensaios efetuados ao UHMWPE obtidos para um ensaio a seco e um ensaio em meio aquoso, utilizando as condições de ensaio: pressão de contacto constante (2MPa), velocidade de deslizamento constante (0.5m/s) e distância de deslizamento de 3500m.

Tabela 4.11 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o HMWPE em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.

<u>Condições Pv</u>	μ	T_f [°C]	W [mm³/(N.m)]
Seco $P=2MPa, v=0.5m/s$	0.27	56	4.48×10^{-4}
Meio aquoso $P=2MPa, v=0.5m/s$	0.24	33	1.19×10^{-4}

Analisando a tabela 4.11 verifica-se que a utilização de um lubrificante resulta numa diminuição muito pequena, ou mesmo desprezável, do coeficiente de atrito. Também se verifica que o coeficiente de desgaste reduz praticamente para um quarto. Analisando a temperatura final dos ensaios verifica-se que a utilização de um lubrificante reduz a temperatura final para valores inferiores comparativamente a um ensaio a seco.

4.4.2. Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do HMWPE, nos ensaios a seco e em meio aquoso

Na figura 4.32 podem observar-se as imagens da superfície dos discos, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, dos ensaios realizados ao HMWPE obtidos para um ensaio a seco e um ensaio em meio aquoso. Verifica-se que existe uma redução de adesão de material à superfície, que explica a redução do coeficiente de desgaste do ensaio a seco para o ensaio em meio aquoso. A lubrificação externa é um método muito útil para reduzir a adesão entre duas superfícies em contacto deslizante diminuindo assim o coeficiente de desgaste comparativamente a condições de deslizamento a seco (Jia et al., 2007). Tanto em ensaios a seco como em ensaios em meio aquoso o principal mecanismo de desgaste verificado nos discos é a adesão.

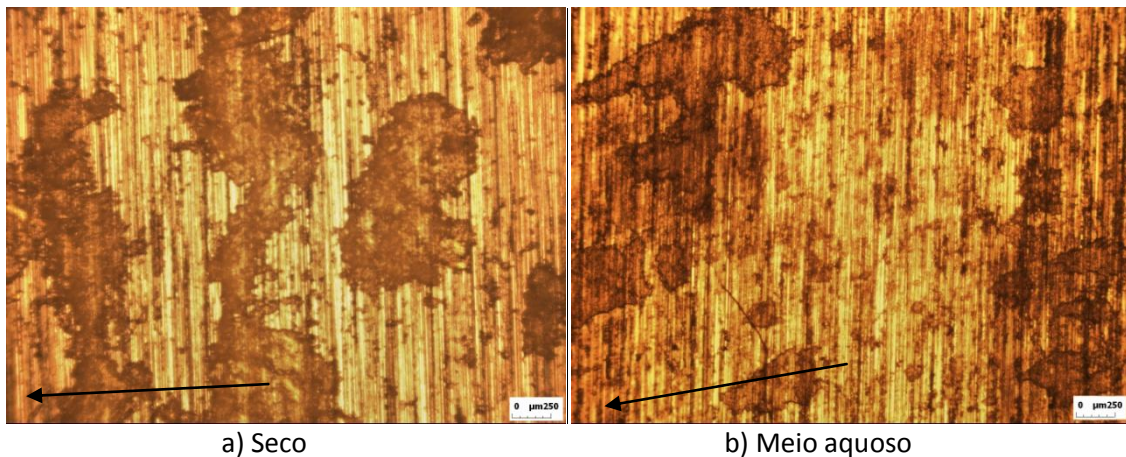


Figura 4.32 – *Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE para diferentes meios envolventes.*

Na figura 4.33 podem observar-se imagens da superfícies dos materiais, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, dos ensaios realizados ao HMWPE para ensaio a seco e para ensaio em meio aquoso. Verifica-se que para o caso do ensaio em meio aquoso, figura 4.33b, não existe deformação pronunciada (com estrias) da superfície por aquecimento, comparativamente com o ensaio a seco. Como o lubrificante, neste caso a água, funciona como refrigerante, a temperatura atingida no ensaio é inferior à temperatura de deformação sob carga sugerida pelo fabricante (44°C), pelo que reduz o amolecimento da superfície do material. Pelo contrário é visível no ensaio a seco, figura 4.33a, que atingiu uma temperatura de 56°C, ocorreu o amolecimento da superfície e uma ligeira deformação associada. Tanto em ensaios a seco como em ensaios em meio aquoso o principal mecanismo de desgaste verificado nas amostras é a abrasão.

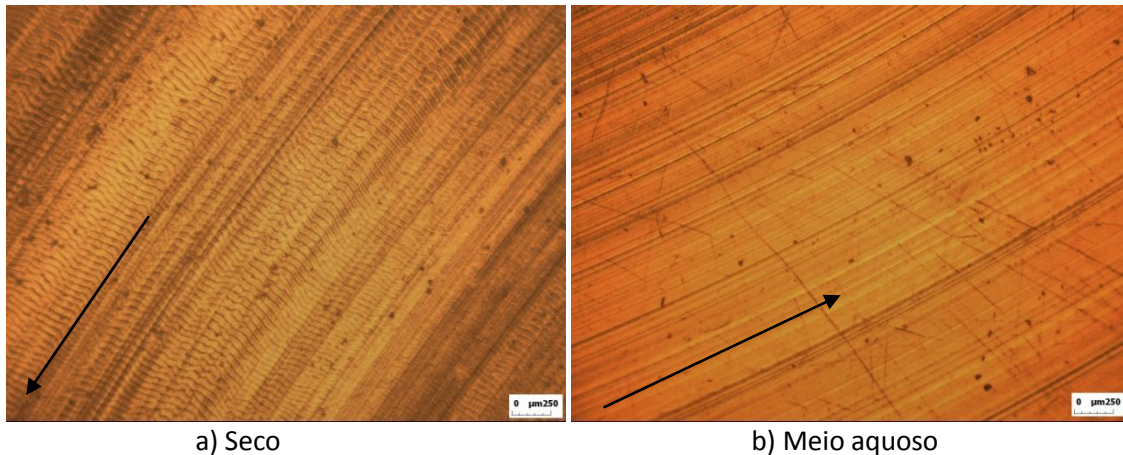


Figura 4.33 – Imagens da superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do HMWPE para diferentes meios envolventes.

4.4.3. Estudo do comportamento tribológico do UHMWPE em meio aquoso

Na figura 4.34 pode observar-se a evolução do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento, obtida nos ensaios realizados ao UHMWPE, para o ensaio a seco e para o ensaio em meio aquoso. O UHMWPE tem uma taxa de absorção de água muito baixa (0.01%), pelo que, as suas propriedades físicas e mecânicas não são comprometidas em meio aquoso. Verifica-se que não existe uma diferença significativa do comportamento tanto em meio aquoso como a seco. Como o HMWPE apresenta boas propriedades auto-lubrificantes e um coeficiente de atrito baixo pode explicar o facto de quando imerso em água o comportamento do HMWPE não ser muito alterado. Outra explicação pode passar pelo facto da adição de água não ter influenciado muito o potencial de contacto entre as duas superfícies, em relação ao ensaio a seco.

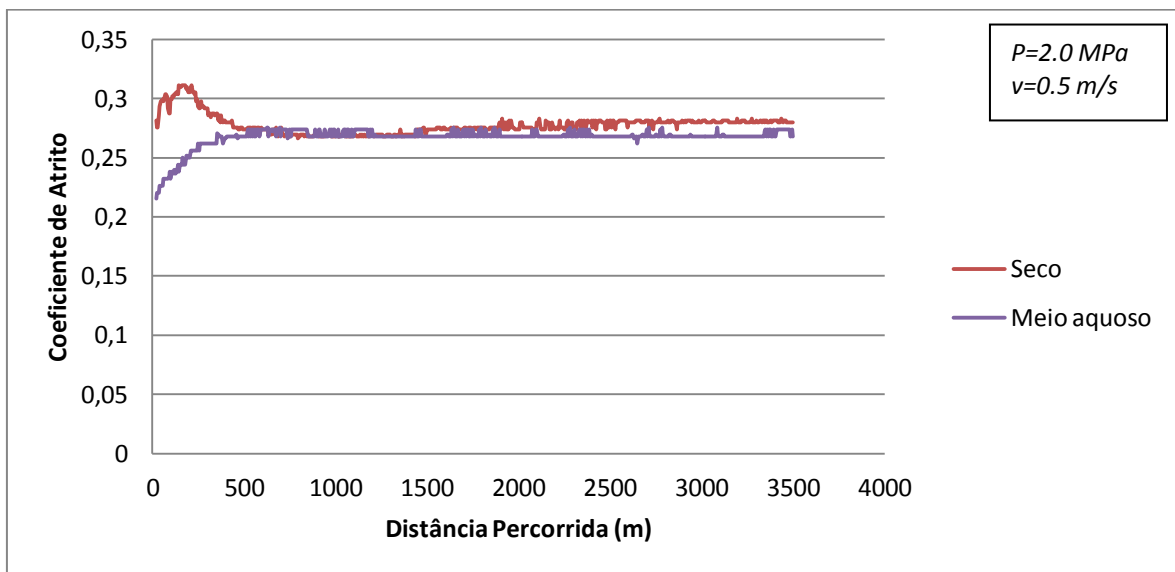


Figura 4.34 – Evolução do coeficiente de atrito, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.

Na figura 4.35 pode observar-se a evolução da temperatura na aresta da superfície do disco, para o ensaio do UHMWPE, em função da distância de deslizamento para o ensaio a seco e para o ensaio em meio aquoso. Assim como se verificou para o HMWPE, a utilização do UHMWPE num meio aquoso também promove um abaixamento significativo da temperatura atingida no ensaio.

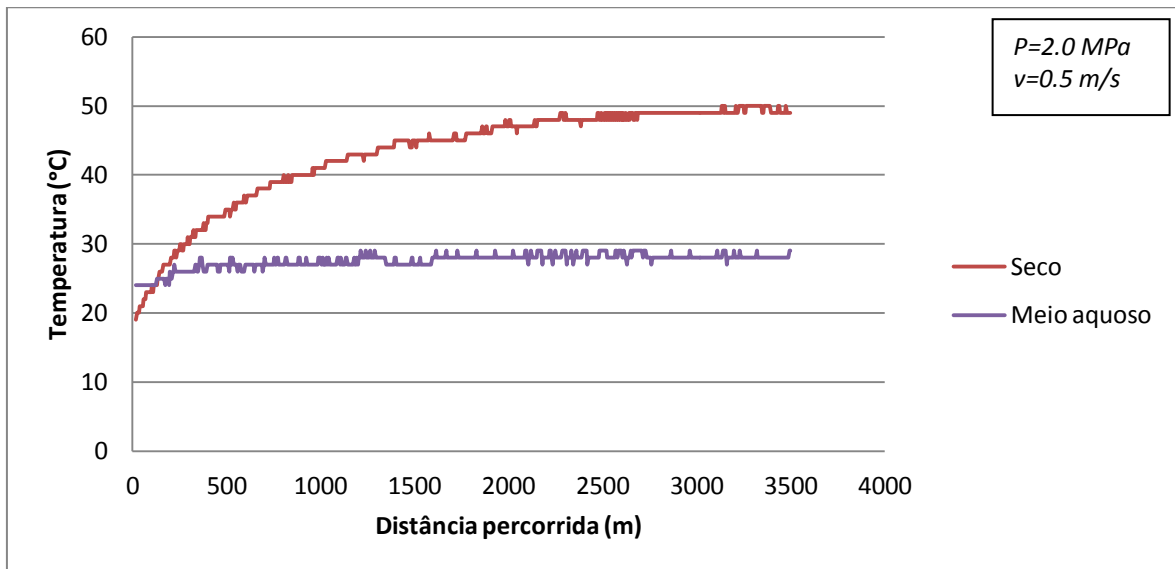


Figura 4.35 – Evolução da temperatura medida no disco, para o UHMWPE, em função da distância de deslizamento para as condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.

Na figura 4.36 podem observar-se os valores do coeficiente de desgaste do UHMWPE, obtidos no ensaio a seco e no ensaio em meio aquoso. Verifica-se que a introdução de um lubrificante, neste caso água, reduz bastante o coeficiente de desgaste.

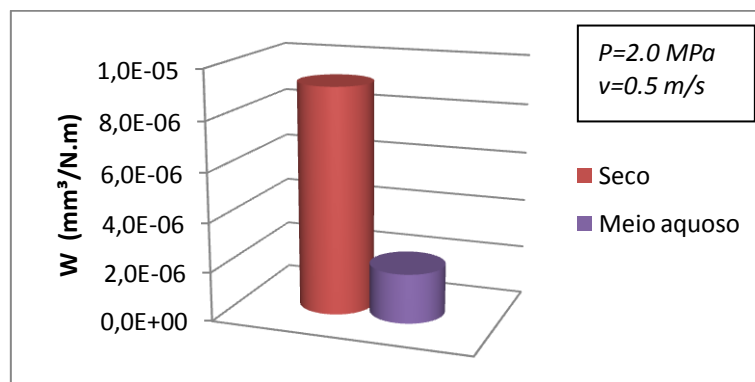


Figura 4.36 – Coeficiente de desgaste para o UHMWPE nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.

Na tabela 4.12 são apresentados os resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , para os ensaios efetuados ao UHMWPE obtidos para um ensaio a seco e um ensaio em meio aquoso,

utilizando as condições de ensaio: pressão de contacto constante (2MPa), velocidade de deslizamento constante (0.5m/s) e distância de deslizamento de 3500m.

Tabela 4.12 – Resultados experimentais do coeficiente de atrito, μ , do coeficiente de desgaste, W , e da temperatura final, T_f , registados no final dos ensaios, para o UHMWPE em estudo nas condições de ensaios enunciadas na tabela 4.10.

Condições Pv	μ	T_f [°C]	W [mm³/(N.m)]
Seco <i>P=2MPa, v=0.5m/s</i>	0.28	49	9.18×10^{-6}
Meio aquoso <i>P=2MPa, v=0.5m/s</i>	0.27	29	2.01×10^{-6}

Analisando a tabela 4.12 verifica-se que a utilização de um lubrificante (água) no ensaio do UHMWPE não resulta num comportamento do coeficiente de atrito diferente e significativo de um ensaio a seco. Também se verifica que o coeficiente de desgaste reduz mais de um quarto. Analisando a temperatura final dos ensaios verifica-se que a utilização do UHMWPE num ensaio em meio aquoso reduz a temperatura final para valores inferiores à temperatura registada num ensaio a seco.

4.4.4. Comparação das superfícies dos discos e do material após deslizamento do UHMWPE, nos ensaios a seco e em meio aquoso

Na figura 4.37 podem observar-se as imagens da superfície dos discos, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, dos ensaios realizados ao UHMWPE obtidos para um ensaio a seco e um ensaio em meio aquoso. Verifica-se que não existe deposição de material na superfície do disco logo não se dá a formação de um tribofilme.

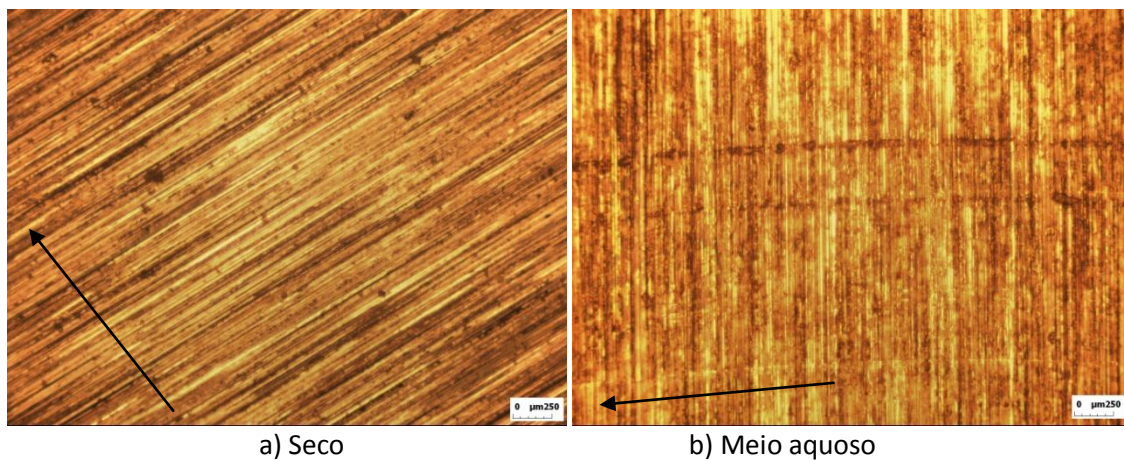


Figura 4.37 – Imagens da superfícies dos discos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do UHMWPE para diferentes meios envolventes.

Comportamento Tribológico de Polietilenos

Na figura 4.38 podem observar-se imagens da superfícies dos materiais, obtidas através do microscópio óptico, após deslizamento, dos ensaios realizados ao UHMWPE para ensaio a seco e para ensaio em meio aquoso. Verifica-se que não existe a formação de estrias pronunciadas à superfície do material. Ainda assim, é observável as marcas de abrasão na superfície do material. Tanto em ensaios a seco como em ensaios em meio aquoso o principal mecanismo de desgaste verificado nas amostras é a abrasão.

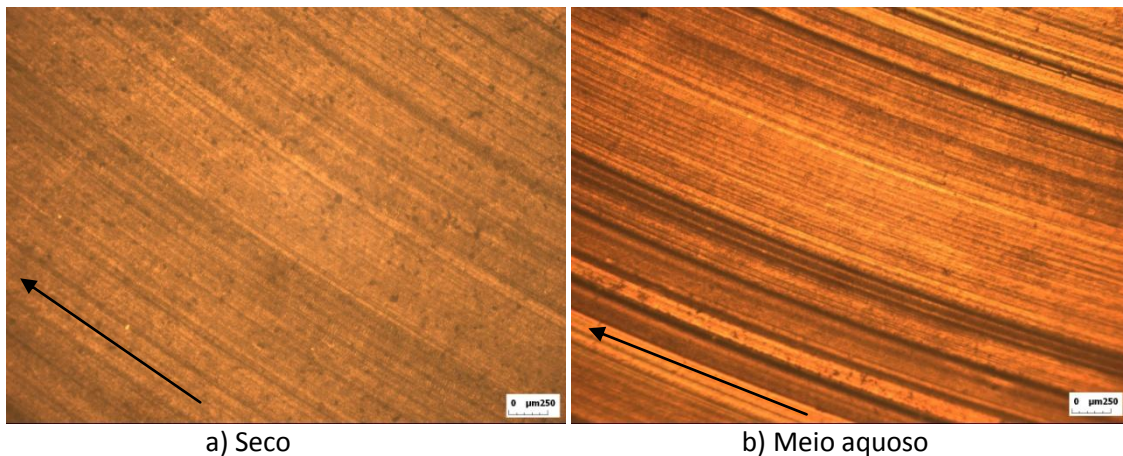


Figura 4.38 – Imagens da superfícies dos pinos, utilizando o microscópio óptico com ampliação 50x, após ensaios do UHMWPE para diferentes meios envolventes.

Capítulo 5.

5. Conclusões

Conclusões

Ao longo do presente trabalho foram efectuados estudos com o intuito de esclarecer alguns aspectos tribológicos de polietilenos, nomeadamente do HMWPE e do UHMWPE. O trabalho foi dividido em quatro fases distintas.

Na primeira fase realizou-se uma comparação do comportamento tribológico dos polietilenos em estudo (HMWPE e UHMWPE) com outros polímeros (PVC, PET, POM-C, PEEK e PA66) para as mesmas condições de pressão de contacto (2MPa) e de velocidade de deslizamento (0.5m/s), para uma distância percorrida de 3500 metros, em deslizamento a seco. Após análise dos resultados concluiu-se que os polietilenos em estudo apresentam um menor valor de coeficiente de atrito (0.27 e 0.28 para o HMWPE e para o UHMWPE respectivamente). O POM-C e o PVC apresentam valores de coeficiente de atrito semelhantes (0.28 para o POM-C e 0.27 para o PVC). Já o PET, o PEEK e o PA66, apresentam maior coeficiente de atrito (0.35, 0.40 e 0.57 para o PET, o PEEK e o PA66, respectivamente). O material que obteve o menor coeficiente de desgaste foi o UHMWPE ($9.18 \times 10^{-6} \text{mm}^3/\text{N.m}$) sendo que o HMWPE foi o segundo polímero com maior coeficiente de desgaste ($4.48 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{N.m}$), apenas ultrapassado pelo PVC ($1.37 \times 10^{-3} \text{mm}^3/\text{N.m}$). Fazendo ainda uma breve referencia aos restantes polímeros, o PEEK apresenta o segundo coeficiente de desgaste mais baixo ($1.90 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{N.m}$), sendo seguido pelo PET ($2.25 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{N.m}$), o PA66 ($2.99 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{N.m}$) e o POM-C ($2.26 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{N.m}$). Para estas condições de pressão de contacto e velocidade, o UHMWPE apresenta um melhor comportamento tribológico (menor coeficiente de atrito e maior resistência ao desgaste), ou seja, este polietileno mostra ser um polímero bastante vantajoso. O HMWPE apesar de apresentar também um menor coeficiente de atrito tem como principal desvantagem o seu elevado coeficiente de desgaste.

O facto do UHMWPE ter um peso molecular tão elevado ($5 \times 10^6 \text{ g/mol}$), apresenta ligações cruzadas das moléculas extremamente fortes que resistem a movimentos vibracionais e rotacionais das cadeias moleculares evitando assim a degradação do polímero. Com esta alta densidade de ligações cruzadas o movimento molecular fica virtualmente impossibilitado, ao ponto que este polietileno não experimenta uma transição vítrea ou o seu consequente amolecimento. Isto resulta numa elevada resistência ao desgaste por parte do UHMWPE. Como o HMWPE tem um peso molecular

inferior ao UHMWPE (0.5×10^6 g/mol) isso implica ligações das cadeias moleculares mais fracas pelo que a resistência ao desgaste diminui consideravelmente. Assim pode ser explicado o facto do HMWPE ter um coeficiente de desgaste elevado.

Numa segunda fase estudou-se a influência da pressão de contacto no comportamento tribológico dos dois polietilenos em estudo, mantendo constante a velocidade de deslizamento (0.5m/s), para uma distância percorrida de 3500 metros, em deslizamento a seco. Verificou-se que a pressão de contacto não tem uma grande influência sobre o comportamento tribológico do HMWPE. Apesar de existir uma tendência para os valores do coeficiente de atrito do HMWPE aumentarem com o aumento da pressão, esse aumento é muito reduzido (aumentou de 0.25 para 0.28) comparativamente ao aumento da pressão de contacto (aumentou de 1MPa para 2.5MPa). Ainda assim o aumento da pressão de contacto promove um aumento do coeficiente de desgaste considerável, pois para o mesmo aumento da pressão de contacto o coeficiente de desgaste aumentou 2.6 vezes (aumentou de 1.78×10^{-4} mm³/N.m para 4.62×10^{-4} mm³/N.m). No UHMWPE parece existir uma maior influência da pressão de contacto no comportamento tribológico do que para o caso do HMWPE. Para um factor $Pv=1.25$ MPa.m/s verifica-se um aumento do coeficiente de atrito mais considerável no UHMWPE do que no HMWPE. Os valores do coeficiente de atrito do UHMWPE, obtidos nos ensaios, estão compreendidos entre os 0.25 e os 0.40. Também o coeficiente de desgaste do UHMWPE sofre um aumento com o aumento da pressão de contacto (2.19×10^{-6} mm³/N.m para 1.18×10^{-5} mm³/N.m). Com estes ensaios conclui-se que o HMWPE apresenta um melhor comportamento ao aumento da pressão de contacto que o UHMWPE. Ainda assim devido ao coeficiente de desgaste muito mais elevado do HMWPE, o UHMWPE apresenta-se mais vantajoso, na gama de valores utilizados.

Na terceira fase estudou-se a influência da velocidade de deslizamento no comportamento tribológico dos dois polietilenos em estudo, mantendo constante a pressão de contacto (1MPa para o HMWPE e 2MPa para o UHMWPE), para uma distância percorrida de 3500 metros, em deslizamento a seco. Após análise dos resultados obtidos nos ensaios efectuados concluiu-se que apesar do aumento da velocidade de deslizamento resultar num ligeiro aumento do coeficiente de atrito, este aumento não é muito significativo na influência no comportamento do coeficiente de atrito do HMWPE, utilizando uma pressão de contacto baixa (1MPa), pois este variou entre 0.25 e 0.33. A variação da velocidade de deslizamento na resistência ao desgaste do HMWPE mostra uma grande influência, dado que o aumento do coeficiente de desgaste é muito elevado (7.82×10^{-5} mm³/N.m para 4.92×10^{-4} mm³/N.m). Como o UHMWPE tem uma resistência ao desgaste muito elevada optou-se por usar uma pressão de contacto maior (2MPa), variando a velocidade de deslizamento. Para esta gama de valores concluiu-se que o coeficiente de atrito do UHMWPE decresce com o aumento da velocidade de

deslizamento, para velocidades a cima dos 0.5m/s. Para velocidades de 0.75, 1 e 1.25m/s mostra uma grande variação no comportamento do coeficiente de atrito. Também é visível que para estas velocidades o coeficiente de atrito atinge um pico entre os 0.51 e os 0.54 decrescendo depois para valores inferiores. O aumento da velocidade de deslizamento promove um aumento do coeficiente de desgaste. Ainda assim, pesando o facto do UHMWPE estar sujeito a uma maior pressão de contacto que o HMWPE, e para o mesmo aumento da velocidade de deslizamento, o UHMWPE demonstra melhor comportamento ao desgaste que o HMWPE.

Na quarta fase realizaram-se ensaios em meio aquoso para estudar o comportamento tribológico dos dois polietilenos, mantendo constante a pressão de contacto (2MPa) e a velocidade de deslizamento (0.5m/s), para uma distância percorrida de 3500 metros, sendo feita uma comparação com as mesmas condições para um ensaio a seco. Da comparação concluiu-se que, em ambos os materiais, a água não tem uma grande influência na redução ou aumento do coeficiente de atrito. Ainda assim verificou-se uma ligeira descida do coeficiente de atrito do HMWPE (0.27 para 0.24). Para o UHMWPE a variação do coeficiente de atrito é insignificante (0.28 para 0.27). Esta situação pode ser explicada pelo facto do potencial de contacto entre as superfícies não ter sido muito influenciado com a adição de água, comparativamente a um ensaio a seco. Analisando o coeficiente de desgaste nos ensaios em meio aquoso observa-se uma grande redução deste relativamente ao coeficiente de atrito registado em ensaios a seco. Em ambos os polietilenos o coeficiente de desgaste reduziu aproximadamente quatro vezes. Para o HMWPE, o coeficiente de desgaste reduziu de $4.48 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ para $1.19 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}$, e para o UHMWPE, o coeficiente de desgaste reduziu de $9.18 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ para $2.01 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. Estes ensaios permitem concluir que a adição de água melhora o desempenho tribológico destes polietilenos ao desgaste.

Numa conclusão mais geral, verifica-se que o principal factor que influencia o comportamento tribológico dos polietilenos HMWPE e UHMWPE é a temperatura. Esta é influenciada pela pressão de contacto e pela velocidade de deslizamento. A temperatura tem um efeito muito grande na resistência ao desgaste destes polietilenos, sendo que a temperaturas superiores à temperatura de deformação sobre carga sugerida pelo fabricante, o HMWPE e o UHMWPE sofrem uma grande variação prejudicial no seu comportamento ao desgaste. Assim a adição de água pode ser considerada um factor de elevada importância num sistema tribológico de polietilenos pois funciona como refrigerante, impedindo que estes atinjam temperaturas prejudiciais às suas propriedades físicas e mecânicas. Conclui-se assim, que o UHMWPE é um material com óptima resistência ao desgaste, o que justifica a escolha deste material, em detrimento de outros, para aplicações de engenharia e também biomédicas (quando o material leva o tratamento para esse efeito), nomeadamente na presença de água no meio envolvente.

Bibliografia

Bibliografia

- Andrade, C. (1995). *Compêndio de Nomenclatura Macromolecular*. Zamora.
- ASTM. (2007). *Annual book of ASTM standards*: ASTM.
- Bhimaraj, P., Burris, D., Sawyer, W. G., Toney, C. G., Siegel, R. W., & Schadler, L. S. (2008). Tribological investigation of the effects of particle size, loading and crystallinity on poly(ethylene) terephthalate nanocomposites. *Wear*, 264(7-8), 632-637.
- Bhushan, B. (1999). *Handbook of micro/nanotribology*: CRC Press.
- Blau, P. J. (1992). Friction, Lubrication, and Wear Technology. *ASM Handbook*, 18.
- Budinski, K. G. (2001). Friction of plastic webs. *Tribology International*, 34(9), 625-633.
- Callister, W. D. (1999). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*: LTC.
- Chauhan, S. R., Kumar, A., & Singh, I. (2010). Sliding friction and wear behaviour of vinylester and its composites under dry and water lubricated sliding conditions. *Materials & Design*, 31(6), 2745-2751.
- Cong, P., Xiang, F., Liu, X., & Li, T. (2008). Effect of crystalline form on the tribological properties of PA46/HDPE polyblends. *Wear*, 265(7-8), 1106-1113.
- Coutinho, F. M. B., Luiz, I. L. M., & Maria, L. C. S. (2003). Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 13(1), 1-13.
- Czichos, H., Klaffke, D., Santner, E., & Woydt, M. (1995). Advances in tribology: the materials point of view. *Wear*, 190(2), 155-161.
- da Silva, C. H., & Sinatora, A. (2007). Development of severity parameter for wear study of thermoplastics. *Wear*, 263(7-12), 957-964.
- Davim, J. P., & Cardoso, R. (2009). Effect of the reinforcement (carbon or glass fibres) on friction and wear behaviour of the PEEK against steel surface at long dry sliding. *Wear*, 266(7-8), 795-799.
- Dowson, D. (1998). *History of tribology*: Professional Engineering Publishing.
- Fahim, M., & Davim, J. P. (2010). Tribology of functionalised carbon nanofillers based polymer composites. *Nova Science Publishers, Inc.*
- Feyzullahoglu, E., & Saffak, Z. (2008). The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions. *Materials & Design*, 29(1), 205-211.

Comportamento Tribológico de Polietilenos

- Franklin, S. E. (2001). Wear experiments with selected engineering polymers and polymer composites under dry reciprocating sliding conditions. *Wear*, 251(1–12), 1591-1598.
- Friedrich, K., Lu, Z., & Hager, A. M. (1995). Recent advances in polymer composites' tribology. *Wear*, 190(2), 139-144.
- Friedrich, K., & Schlarb, A. K. (2008). *Tribology of polymeric nanocomposites: friction and wear of bulk materials and coatings*: Elsevier.
- Gao, J. (2000). Tribochemical effects in formation of polymer transfer film. *Wear*, 245(1–2), 100-106.
- Gao, J., Mao, S., Liu, J., & Feng, D. (1997). Tribochemical effects of some polymers/stainless steel. *Wear*, 212(2), 238-243.
- Gnauck, B., & Fründt, P. (1991). *Iniciación a la química de los plásticos*: Hanser.
- Greco, A. C., Erck, R., Ajayi, O., & Fenske, G. (2011). Effect of reinforcement morphology on high-speed sliding friction and wear of PEEK polymers. *Wear*, 271(9–10), 2222-2229.
- Habib, B. (2008). Friction wear and acoustic emissions of some plastics sliding against Si₃N₄. *Wear*, 264(1–2), 152-156.
- Harsha, A. P. (2011). An investigation on low stress abrasive wear characteristics of high performance engineering thermoplastic polymers. *Wear*, 271(5-6), 942-951.
- Jamison, W. E. (1994). *Plastics and Plastic Matrix Composites* (Vol. Volume III): CRC Press.
- Jia, B.-B., Li, T.-S., Liu, X.-J., & Cong, P.-H. (2007). Tribological behaviors of several polymer–polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions. *Wear*, 262(11–12), 1353-1359.
- Kashani, M. R., Behazin, E., & Fakhar, A. (2011). Construction and evaluation of a new tribometer for polymers. *Polymer Testing*, 30(3), 271-276.
- Li, X. Y., Dong, H., & Shi, W. (2001). New insights into wear of Ti6Al4V by ultra-high molecular weight polyethylene under water lubricated conditions. *Wear*, 250(1–12), 553-560.
- Liu, C. Z., Wu, J. Q., Li, J. Q., Ren, L. Q., Tong, J., & Arnell, A. D. (2006). Tribological behaviours of PA/UHMWPE blend under dry and lubricating condition. *Wear*, 260(1–2), 109-115.
- Lucas, A. d. A., Ambrósio, J. D., Otaguro, H., Costa, L. C., & Agnelli, J. A. M. (2011). Abrasive wear of HDPE/UHMWPE blends. *Wear*, 270(9–10), 576-583.
- Ludema, K. C. (1996). *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*: CRC Press.
- Magalhães, A. B., & Baptista, A. P. (1983). *Introdução à tribologia* (Vol. Nº 1). Porto.
- Mano, E. B. (1999). *Introdução a polímeros*: EDGARD BLUCHER.

Comportamento Tribológico de Polietilenos

- Marcus, K. (2005). Tribology based research at UCT: some recent case studies. *Tribology International*, 38(9), 843-847.
- McNicol, A., Dowson, D., & Davies, M. (1995). The effect of humidity and electrical fields upon the wear of high density polyethylene and polytetrafluoroethylene. *Wear*, 181–183, Part 2(0), 603-612.
- Myshkin, N. K., Petrokovets, M. I., & Kovalev, A. V. (2006). Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. *Tribology International*, 38(11–12), 910-921.
- Neale, M. J. (1995). *The tribology handbook*: Butterworth-Heinemann.
- OCDE. (1969). *Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication (tribology)*: O.E.C.D.
- Pal, K., Rajasekar, R., Kang, D. J., Zhang, Z. X., Pal, S. K., Kim, J. K., & Das, C. K. (2010). Effect of fillers and nitrile blended PVC on natural rubber/high styrene rubber with nanosilica blends: Morphology and wear. *Materials & Design*, 31(1), 25-34.
- Palabiyik, M., & Bahadur, S. (2000). Mechanical and tribological properties of polyamide 6 and high density polyethylene polyblends with and without compatibilizer. *Wear*, 246(1–2), 149-158.
- Partners, P. a. (1998). *Manual do Tribómetro Plint TE67/HT*.
- Persson, B. N. J. (1999). Sliding friction. *Surface Science Reports*, 33(3), 83-119.
- Quaglini, V., Dubini, P., Ferroni, D., & Poggi, C. (2009). Influence of counterface roughness on friction properties of engineering plastics for bearing applications. *Materials & Design*, 30(5), 1650-1658.
- Ramanathan, M., & Darling, S. B. (2011). Mesoscale morphologies in polymer thin films. *Progress in Polymer Science*, 36(6), 793-812.
- Renouf, M., Massi, F., Fillot, N., & Saulot, A. (2011). Numerical tribology of a dry contact. *Tribology International*, 44(7-8), 834-844.
- Seymour B, E. (2002). Orismology (the science of defining words) and the geometrical foundations of chemistry. 8. Polymers. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 589–590(0), 27-35.
- Silva, C. H., Tanaka, D. K., & Sinatora, A. (1999). The effect of load and relative humidity on friction coefficient between high density polyethylene on galvanized steel—preliminary results. *Wear*, 225–229, Part 1(0), 339-342.
- Smith, W. F. (1998). *Princípios de ciência e engenharia de materiais*: McGraw-Hill.
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2005). *Engineering tribology*: Elsevier Butterworth-Heinemann.

Comportamento Tribológico de Polietilenos

- Sumer, M., Unal, H., & Mimaroglu, A. (2008). Evaluation of tribological behaviour of PEEK and glass fibre reinforced PEEK composite under dry sliding and water lubricated conditions. *Wear*, 265(7–8), 1061-1065.
- Tan, Z. H., Guo, Q., Zhao, Z. P., Liu, H. B., & Wang, L. X. (2011). Characteristics of fretting wear resistance for unfilled engineering thermoplastics. *Wear*, 271(9–10), 2269-2273.
- Unal, H., & Mimaroglu, A. (2003). Friction and wear behaviour of unfilled engineering thermoplastics. *Materials & Design*, 24(3), 183-187.
- Unal, H., Sen, U., & Mimaroglu, A. (2004). Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface. *Tribology International*, 37(9), 727-732.
- Viswanath, N., & Bellow, D. G. (1995). Development of an equation for the wear of polymers. *Wear*, 181-183, Part 1(0), 42-49.
- Wang, Y. Q., & Li, J. (1999). Sliding wear behavior and mechanism of ultra-high molecular weight polyethylene. *Materials Science and Engineering: A*, 266(1–2), 155-160.
- Zambelli, G., & Vincent, L. (1998). *Matériaux et contacts: une approche tribologique*: Presses polytechniques et universitaires romandes.

Anexos

Tabela 7.1 – Tabela das propriedades dos materiais utilizados nos ensaios, sugerida pelo fornecedor (cortesia da Lanema).

PROPRIEDADES	Métodos de teste	Unidades	HMWPE	UHMWPE	PVC	POM-C	PET	PA66	PEEK
<i>Peso molecular</i>	-	10 ⁶ g/mol	0.5	5	-	-	-	-	-
<i>Densidade</i>	ISO 1183-1	g/cm ³	0.96	0.93	1.4	1.41	1.39	1.14	1.31
<i>Absorção de água:</i>									
<i>- após 24/96 horas de imersão em água a 23°C</i>	ISO 62	%	-	-	-	0.24/0.45	0.07/0.16	40/76	5/10
<i>- na saturação do ar a 23°C e 50% HR</i>	-	%	-	-	0.2	0.20	0.25	2.4	0.20
<i>- na saturação da água a 23°C</i>	-	%	0.01	0.01	-	0.80	0.50	8	0.54
Propriedades Térmicas									
<i>Temperatura de fusão (DSC, 10°C/min)</i>	ISO 11357-1/-3	°C	135	135	-	165	245	260	340
<i>Temperatura de transição vítrea (DSC, 20°C/min)</i>	ISO 11357-1/-3	°C	-	-	80	-	-	-	-
<i>Condutividade térmica a 23°C</i>	-	W/(K.m)	0.40	0.40	0.14	0.31	0.29	0.28	0.25
<i>Coefficiente de expansão térmica linear:</i>									
<i>- valor médio entre 23 e 60°C</i>	-	m/(m.K)	-	-	82x 10 ⁻⁶	110x 10 ⁻⁶	60x 10 ⁻⁶	80x 10 ⁻⁶	50x 10 ⁻⁶
<i>- valor médio entre 23 e 100°C</i>	-	m/(m.K)	150x 10 ⁻⁶	200 x 10 ⁻⁶	-	125x 10 ⁻⁶	80x 10 ⁻⁶	95x 10 ⁻⁶	55x 10 ⁻⁶
<i>Temperatura máxima de serviço ao ar:</i>									
<i>- para períodos curtos</i>	-	°C	120	120	80	140	160	180	310
<i>-continuação para 20 000h</i>	-	°C	80	80	65	100	100	80	250
<i>Temperatura de deformação sob carga:</i>									
<i>- Método a 1.8MPa</i>	ISO 75-1/-2	°C	44	42	-	100	80	85	160
<i>Temperatura mínima de serviço</i>	-	°C	-100	-200	-15	-50	-20	-30	-50
<i>Inflamabilidade:</i>									
<i>- "Índice de oxigénio"</i>	ISO 4589-1/-2	%	<20	<20	-	15	25	26	35
<i>- de acordo com UL 94 (6mm espessura)</i>	-	-	HB	HB	B1 (p/ e=1.6mm)	HB	HB	V-2	V-0

Propriedades Mecânicas a 23°C									
Teste à tração:									
- Resistência à tração	ISO 527-1/-2	MPa	28	19	>55	66	90	93	115
- Módulo de elasticidade	ISO 527-1/-2	MPa	1300	750	>3100	2800	3500	3550	4300
Teste de compressão:									
- Resist. à compressão a 1/2/ 5% de def. nominal	ISO 604	MPa	12/18.5/26.5	6.5/10.5/17	70 (apenas com 2%)	19/35/67	26/51/103	25/49/92	38/75/-
Resistência ao impacto de Charpy não entalhado	ISO 179-1/1eU	kJ/m ²	s/ ruptura	s/ruptura	s/ ruptura 0°C	150	50	s/ ruptura	s/ ruptura
Resistência ao impacto de Charpy entalhado	ISO 179-1/1Ea	kJ/m ²	105P	115P	>4 até 23°C	7	2	4.5	3.5
Resistência ao impacto de Izod com entalhe	ISO 180/A	kJ/m ²	-	-	-	7	2	4.5	-
Dureza Shore D (15S)	ISO 2039-2	-	62	60	-	-	-	-	-
Dureza de Rockwell	ISO 2039-2	-	-	-	-	M 84	M 96	M 88	M 105
Propriedades Elétricas									
Rigidez elétrica	IEC 60243-1	kV/mm	45	45	20 – 40	20	22	27	24
Resistividade volumétrica	IEC 60093	Ohm.cm	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁵	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴
Resistividade superficial	IEC 60093	Ohm	>10 ¹²	>10 ¹²	>10 ¹³	>10 ¹³	>10 ¹³	>10 ¹³	>10 ¹³
Permitividade relativa ϵ_r:									
- a 100 Hz	IEC 60250	-	2.4	2.1	-	3.8	3.4	3.9	3.2
- a 1 MHz	IEC 60250	-	2.4	3.0	3.0	3.8	3.2	3.3	3.2
Factor de dissipação dielétrica ($\tan \delta$):									
- a 100 Hz	IEC 60250	-	0.0002	0.0004	0.01	0.003	0.001	0.013	0.001
- a 1 MHz	IEC 60250	-	0.0002	0.0010	-	0.008	0.014	0.020	0.002
Índice de seguimento comparativo (CTI)	IEC 60112	-	600	600	-	600	600	600	150

