



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Desgaste de Materiais Dentários – Estudo da Influência de Diferentes Soluções Abrasivas.

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Autor

Ricardo José Oliveira Silva

Orientadores

Prof. Doutor Amílcar Lopes Ramalho

Prof. Doutor Pedro Vale Antunes

Júri

Presidente	Professor Doutor José António Martins Ferreira Professor Catedrático da Universidade de Coimbra Professora Doutora Eunice Virgínea Valdez Faria Bidarra Palmeirão Carrilho
Vogais	Professora Associada c/agregação da Universidade de Coimbra Doutor Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva Bolseiro da Universidade de Coimbra Professor Doutor Pedro Alexandre de Almeida do Vale
Orientador	Antunes Investigador auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2014

Os trabalhos escolares são provas para o carácter, não para a inteligência. Quer se trate de ortografia, de poesia ou de cálculo, está sempre em causa aprender a querer.

Alain, em *Les Idées et les Âges*, 1927.

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao Senhor Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho, pelo apoio, a competência com que me orientou, o tempo despendido, os valiosos conhecimentos transmitidos e disponibilização dos recursos necessários.

Ao Senhor Professor Doutor Pedro Vale Antunes, pelo constante acompanhamento, dedicação e paciência, pela permanente disponibilidade e por tantos valiosos conhecimentos transmitidos.

Um agradecimento também ao Miguel Esteves, pela constante prontidão em ajudar, e pelas horas perdidas em meu auxílio.

Ao grupo de Construções Mecânicas, que disponibilizou as instalações e os equipamentos necessários.

Aos meus pais, pela sua indubitável confiança no meu sucesso, que em momento algum deixaram de acreditar em mim, e sem o esforço e dedicação dos quais nunca me seria possível concluir esta etapa. À minha mãe que sempre teve uma palavra de conforto e motivação, que em momentos complicados fez toda a diferença. Ao meu pai, pelos tantos sacrifícios que me permitiram ter esta oportunidade.

Ao meu irmão, pelo contínuo interesse no meu trabalho, pela força que me transmitiu em momentos complicados e por em nenhum momento duvidar de mim.

Aos meus amigos, por todas as diversas formas com que me ajudaram, não só durante esta tese, mas ao longo de todo o meu percurso académico, tanto em momentos de diversão como nos momentos de trabalho.

Aos meus colegas do “bunker”, que para além dos bons momentos passados, me ajudaram em momentos difíceis durante a realização desta dissertação.

Resumo

Este estudo surge como resposta à necessidade de uma melhor caracterização dos materiais usados em restaurações de dentes posteriores, e à necessidade de comparar valores obtidos em ensaios de caracterização com diferentes soluções abrasivas.

A presente dissertação tem como objetivo o estudo da influência das soluções abrasivas no desgaste de materiais de restauração dentária, em ensaios de desgaste *in vitro*.

Inicialmente foi identificada a abrasão a três corpos como principal causa de desgaste, sendo este então o ponto fulcral a estudar. A escolha do tipo de ensaio a realizar, bem como das condições de ensaio e materiais tem por base estudos anteriormente realizados, que forneceram informações decisivas para a seleção adequada dos parâmetros de teste.

Assim, foram selecionadas três diferentes soluções abrasivas, para posteriormente ser analisada a sua influência no desgaste abrasivo de um compósito comercial (Synergy), quando sujeito a determinadas condições de carga e duração de ensaio.

Concluiu-se que seriam necessários ensaios alternativos de escorregamento para a completa caracterização do compósito.

Os resultados experimentais foram avaliados aplicando modelos de tratamento de dados, previamente selecionados, como o modelo linear de Archard para desgaste, o modelo de atrito de Coulomb e uma abordagem energética para relacionar a energia dissipada com o volume de material removido.

Finalmente foram comparados os volumes de desgaste dos compósitos e respectivos antagonistas, para cada uma das soluções usadas, e, as suas superfícies de desgaste analisadas em microscopia eletrônica de varrimento. A análise dos resultados tem por objetivo avaliar a influência das soluções abrasivas no desgaste abrasivo de compósitos usados em restaurações dentárias.

Palavras-chave: Desgaste alternativo, Abrasão a três corpos, Tribologia, Solução abrasiva, Resina compósito, Deslizamento.

Abstract

This study arises as the answer to the necessity of a better characterization of the materials used in the restoration of posterior teeth and the need to compare the values obtained in characterization trials with different abrasive solutions.

This dissertation has the goal to study the influence of abrasive solutions in the dental restoration material wear, by conducting *in vitro* wear trials.

Initially it was identified the three body abrasion as the main wear cause, which is the main study issue in this dissertation. The choice of trial type, as well as the trial conditions and materials was based on previous studies which provided decisive information for the selection of adequate laboratorial parameters.

Therefore, three different abrasive solutions were selected for posteriorly analyzing their influence on the abrasive wear of a commercial composite (Synergy), when subjected to several load and duration test conditions.

It was concluded that it would be required reciprocating sliding tests to obtain a more complete composite characterization.

The experimental results were evaluated by applying previously selected data treatment models, as it is the case of the Archard's wear model, the Coulomb friction model and an energetic approach which relates the dissipated energy by friction with the volume of removed material.

Finally the wear volume results for composite and antagonists, for each abrasive solutions used, and the observation of wear scars with scanning electron microscope. The result analysis was focused on the assessment of the influence of the solution type on the obtained wear behavior of the posterior restorative composite material.

Keywords Reciprocating wear, three body abrasion, Tribology, Abrasive solution, Resin composite, Sliding.

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	viii
Simbologia e Siglas	ix
Simbologia.....	ix
Siglas	x
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Condições de serviço, <i>in vivo</i>	3
2.2. Ensaios abrasivos.....	6
2.2.1. Abrasão a dois corpos.....	6
2.2.2. Abrasão a três corpos.....	7
2.2.3. Soluções Abrasivas.....	9
2.2.4. Antagonistas	9
2.2.5. Simuladores de desgaste.....	10
2.3. Materiais de restauração dentária.....	12
3. Materiais, Equipamentos e Procedimentos.....	17
3.1. Materiais	17
3.1.1. Compósito Synergy Compact.....	17
3.1.2. Material antagonista	19
3.1.3. Soluções abrasivas.....	20
3.2. Equipamentos.....	22
3.2.1. Tribómetro para ensaios de desgaste	22
3.2.2. Equipamentos de medida.....	25
3.3. Procedimentos.....	29
3.3.1. Planeamento dos ensaios	29
3.3.2. Testes tribológicos.....	32
4. Análise e Discussão de Resultados.....	36
4.1. Estudos prévios	36
4.2. Apresentação de resultados.....	38
5. Conclusões.....	55
Referências Bibliográficas.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Provetes Synergy Compact antes e após ensaio abrasivo.	19
Figura 3.2. Antagonista, esfera de vidro e suporte.	19
Figura 3.3. Abrasivos: zeoesferas, PMMA e sementes de papoila.....	20
Figura 3.4. Tribómetro para ensaios de desgaste com movimento alternativo.	23
Figura 3.5. Fluxograma esquemático da aquisição de dados no tribómetro.	24
Figura 3.6. Rugosímetro laser <i>Rodenstock RM600</i>	25
Figura 3.7. Perfis de desgaste de ensaios com zeosferas, obtidos com o <i>software</i> Gwyddion.	26
Figura 3.8. Microscópio ótico <i>Mitutoyo Toolmaker's Microscopes</i>	26
Figura 3.9. Microscópio ótico <i>Nikon Stereo Photo SMZ</i> e máquina fotográfica <i>Canon</i> <i>PowerShot A620</i>	27
Figura 3.10. Durómetro <i>Struers Duramin</i>	28
Figura 3.11. Microscópio eletrônico de varrimento.	28
Figura 3.12. Representação do equipamento para ensaios alternativos de contacto esfera- plano.	32
Figura 3.13. Exemplo de marca de desgaste no antagonista.	35
Figura 4.1. Influência da velocidade do ensaio no desgaste do compósito, para a solução abrasiva de zeosferas.	36
Figura 4.2. Perfí de desgaste obtido com solução abrasiva de sementes de papoila num ensaio com frequência de 5 Hz, 5 N e 50000 ciclos.....	37
Figura 4.3. Volume de desgaste do compósito em função da fração volúmica de sementes de papoila.	37
Figura 4.4. a) Volumes de desgaste de: a) compósito, e, b) antagonista, para uma solução abrasiva de zeosferas.	38
Figura 4.5. Volumes de desgaste de: a) compósito, e, b) antagonista, para uma solução abrasiva de PMMA.....	39
Figura 4.6. Volumes de desgaste de: a) compósito, e, b) antagonista, para uma solução abrasiva de sementes de papoila.....	40
Figura 4.7. Força de atrito em função da carga normal para as soluções abrasivas de: a) zeoesferas, b) PMMA, e, c) sementes de papoila.....	41
Figura 4.8. Volumes de desgaste do: a) compósito, e, b) antagonista, em função da energia dissipada pela força de atrito, para a solução abrasiva de zeosferas.	42

Figura 4.9. Volumes de desgaste do: a) compósito, e, b) antagonista, em função da energia dissipada pela força de atrito, para a solução abrasiva de PMMA.....	42
Figura 4.10. Volumes de desgaste do: a) compósito, e, b) antagonista, em função da energia, para a solução abrasiva de sementes de papoila.	43
Figura 4.11. Representação do contacto.	46
Figura 4.12. Marcas de desgaste de zeosferas num ensaio com 3N e 2600 ciclos: a) marca total de desgaste, b) extremidade da zona contacto, c) partícula de grandes dimensões arrancada.....	48
Figura 4.13. Marca de desgaste obtida com PMMA: a) num ensaio com 1,3 N e 20000 ciclos, b) num ensaio de 4 N e 20000 ciclos, c) num ensaio de 3 N e 20000 ciclos	49
Figura 4.14. Acumulação de material no bordo do contacto num ensaio com PMMA com 3 N e 2000 ciclos.	49
Figura 4.15. Partículas soltas em ensaio de PMMA, com 3 N e 20000 ciclos.....	50
Figura 4.16. Mistura de partículas com detritos de compósito, num ensaio de PMMA com 4 N e 20000 ciclos.	50
Figura 4.17. Zona de contacto com pequenos detritos, com ligação da matriz com partículas de reforço e aglomerados de partículas de PMMA, num ensaio 3 N e 20000 ciclos.....	51
Figura 4.18. Compactação de compósito nas pistas de desgaste num ensaio com PMMA com 3 N e 20000 ciclos.	51
Figura 4.19. Marcas abrasivas provocadas por sementes de papoila num ensaio com 13 N e 15000 ciclos.....	52
Figura 4.20. Marcas características obtidas em antagonistas em ensaios de zeosferas.....	52
Figura 4.21. Marca característica obtida no antagonista num ensaio de PMMA.....	53
Figura 4.22. Marca característica obtida no antagonista num ensaio de sementes de papoila.	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Valores de volume de desgaste e desgaste por ciclo, em estudos <i>in vivo</i> em molares.	5
Tabela 2.2. Características de testes de desgaste a dois corpos [2] [8] [11].....	7
Tabela 2.3. Características de testes de desgaste a três corpos [8] [11].	8
Tabela 2.4. Constituição típica de amálgama dental.	12
Tabela 2.5. Classificação de compósitos de resinas segundo, tamanho de partícula, distribuição do tamanho de partícula e aplicação clínica [1].	14
Tabela 3.1. Propriedades mecânicas do compósito e respectivos desvios padrão (DP) [1].	18
Tabela 3.2. Características físicas e dimensionais das esferas de vidro [1].	20
Tabela 3.3. Composição, frações volúmicas e mássicas das soluções abrasivas usadas no estudo.....	22
Tabela 3.4. Condições dos ensaios abrasivos de microesferas de vidro, Zeoesferas, frequência do ensaio, carga normal, duração e severidade.	30
Tabela 3.5. Condições dos ensaios abrasivos de partículas de PMMA, frequência do ensaio, carga normal, duração e severidade.	31
Tabela 3.6. Condições dos ensaios abrasivos de sementes de papoila; frequência do ensaio, carga normal, duração e severidade.	31
Tabela 4.1. Cálculo do coeficiente de atrito para as soluções abrasivas estudadas.....	44
Tabela 4.2. Valores de k e k' , para cada uma das soluções abrasivas estudadas.....	45
Tabela 4.3. Valor de volume e altura de desgaste do compósito por ciclo, para cada solução abrasiva.....	47

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A – Área de secção transversal da calote cilíndrica

a – Largura máxima da calote cilíndrica

E – Energia total

F_a – Força de atrito

H – Dureza

h – Profundidade da marca de desgaste

K – Coeficiente de desgaste - adimensional

k – Coeficiente de desgaste

k' – Coeficiente de desgaste energético ou em função da força de atrito

l – Comprimento de contacto

N – Carga Normal

n – Número de ciclos

P – Pressão

R – Raio da esfera antagonista

r – Raio da marca de desgaste

r_1 – Raio da marca de desgaste horizontal

r_2 – Raio da marca de desgaste vertical

V – Volume de material removido

x – Distância de ensaio

θ – Ângulo de abertura da calote cilíndrica

μ – Coeficiente de atrito

μ_E – Coeficiente de atrito no modelo energético

Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FDA – Federal Drug Administration

GLP – Good Laboratory Practice

ISO – International Standards Organization

MEV – Microscopia Eletrónica de Varrimento

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a necessidade de encontrar alternativas aos materiais existentes para restaurações dentárias de dentes posteriores, tem levado a uma intensificação dos estudos de caracterização de materiais ao desgaste, visto ser este o principal fator de ruína dos materiais na boca.

A principal dificuldade nesse processo de caracterização prende-se com a complexidade do ambiente a que esses materiais estão sujeitos na cavidade oral. Os estudos *in vivo*, nem sempre são uma boa opção, visto que estes requerem um elevado tempo, e os resultados são muito variáveis, pois o desgaste dos dentes e/ou materiais de restauração dentária, é um processo complexo onde coexistem processos físicos e químicos que interagem entre si. Para além disso existe ainda uma grande dificuldade de avaliação e medição do desgaste final, pois os métodos *in vivo* não permitem isolar e estudar os processos individuais de desgaste e a sua contribuição para o processo completo.

A solução normalmente adotada é então a simulação do desgaste *in vitro*. No entanto, esta avaliação tem também alguns inconvenientes, como os elevados custos de equipamentos de simulação, a dificuldade em transpor os resultados obtidos para a situação *in vivo*, e a grande variedade de parâmetros a controlar nessas simulações.

O objetivo da presente dissertação é então a avaliação da influência das soluções abrasivas nos ensaios de desgaste *in vitro* de materiais compósitos de restauração dentária, visto este ser um parâmetro crucial no desgaste. Procura-se também com este estudo a comparação de resultados obtidos para as soluções abrasivas e o desgaste fisiológico encontrado na bibliografia.

Esta dissertação está então dividida em cinco capítulos, sendo que o primeiro corresponde à introdução. O segundo capítulo contempla a revisão bibliográfica, e permite um melhor enquadramento no tema a discutir. No terceiro capítulo são apresentados e descritos os materiais usados, os equipamentos a que se recorreu tanto para os ensaios como para a posterior análise de resultados, e finalmente os procedimentos dos ensaios realizados. No quarto capítulo são inicialmente analisados alguns estudos prévios efetuados, a que se

segue a apresentação dos resultados e a respetiva discussão. Finalmente as conclusões são apresentadas no quinto e último capítulo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O aparecimento nos últimos 25 anos das resinas compósitas na restauração dentária surge em resposta à necessidade de aumentar as alternativas à amálgama usada há 150 anos, tanto por razões estéticas como de biocompatibilidade e de toxicidade, devido à presença de mercúrio na amálgama [1].

Devido ao “ambiente particular da boca”, que proporciona condições de serviço muito variáveis, torna-se necessário uma boa caracterização dos materiais de restauração dentária quanto ao seu comportamento ao desgaste, e, conhecimento da sua resposta às condições a que estarão sujeitos. De modo a caracterizar estas resinas compósitas existem vários tipos de ensaios que tentam otimizar e simular as condições a que o material de restauração dentária estará sujeito na boca.

A primeira dificuldade surge com o elevado número de parâmetros que afetam o comportamento ao desgaste dos materiais de restauração dentária. Assim, os parâmetros controlados nos diversos tipos de ensaios são normalmente; carga normal, comprimento de deslizamento, número de ciclos, tipo de movimento (impacto, deslizamento, combinação de movimentos) e solução abrasiva, bem como a sua concentração [2]. A variação destes parâmetros e dos próprios equipamentos usados nos estudos *in vitro* é bastante distinta, dificultando à partida, a comparação dos resultados obtidos.

2.1. Condições de serviço, *in vivo*

Conhecer as condições reais de um determinado ambiente é imprescindível quando se pretende simular o comportamento de determinado material nesse mesmo ambiente. Alguns dos parâmetros mais relevantes das condições a que os materiais de restauração dentária estarão sujeitos na cavidade oral são: [3].

- Temperatura: 10 até 50 °C;
- Saliva como lubrificante, solução complexa de proteínas contendo sal;
- Intervalo de acidez: 1 a 9 (pH);
- Força de contacto: 1 a 700 N;
- Força de mastigação: 6 a 130 N;

- Tensão de contacto: 200 MPa;
- Taxa de carga: 1 ciclo a 1500 ciclos por dia;
- Distância de contacto: 30 km em 50 anos de vida do dente:
 - 0,5 - 1 mm/ciclo;
 - 0,6 km/ano.

As principais categorias de desgaste que contribuem para a destruição de tecidos dentários e materiais restauradores são:

- Desgaste fisiológico - funções vitais;
- Desgaste patológico - doenças e condições anormais;
- Desgaste profilático - medidas preventivas;
- Desgaste no procedimento de acabamento.

Pouco é conhecido sobre o progresso normal de desgaste do esmalte humano *in vivo*, devido à complexidade do ambiente que se encontra na cavidade oral e por ser um processo muito lento que portanto exige um tempo de estudo bastante longo. Os resultados, no que concerne a tipo de contacto, duração dos estudos, e valores medidos de desgaste, dos poucos estudos existentes sobre desgaste *in vivo* estão sumariados na Tabela 2.1.

Os estudos aqui referenciados apresentam valores de altura de desgaste e não de volume total de desgaste, uma vez que sendo estes estudos *in vivo*, existe uma grande dificuldade em medir o volume de desgaste corretamente devido à grande área de contacto.

Destaque-se ainda que o valor da altura de desgaste apresentado corresponde sempre à maior medida encontrada em toda a superfície de contacto, e que o aumento desta grandeza não é, na quase totalidade dos estudos aqui referidos, linear com o tempo do estudo, devido ao aumento gradual da superfície de contacto entre os dentes que leva uma distribuição da pressão e conseqüente aumento da área de desgaste.

Note-se que não é feita distinção entre os tipos de cerâmicos usados nos diferentes estudos, que por eventualmente terem propriedades mecânicas díspares podem ter alguma influência nos resultados medidos. Tendo em conta os valores referidos na bibliografia para o intervalo de ciclos de mastigação diária [3], foi considerado neste estudo, um valor médio de 1000 ciclos de mastigação diários, para o cálculo dos valores de desgaste por ciclo *in vivo*, apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Valores de volume de desgaste e desgaste por ciclo, em estudos *in vivo* em molares.

Materiais de contacto	Ref.	Corpo	Duração de teste [meses]	Estimativa de ciclos [$\times 10000$]	Altura máx. de desgaste. [mm]	Desgaste por ciclo [mm/ciclo]	
Esmalte / Esmalte	[4]	-	24	73	9,10E-02	1,26E-07	
			36	108	1,22E-01	1,13E-07	
			48	144	1,53E-01	1,06E-07	
Esmalte / Esmalte	[5]	Dente 1	24	73	5,20E-02	7,12E-08	
		Dente 2			5,80E-02	5,30E-08	
Cerâmico					36	108	7,20E-02
		Esmalte					1,10E-01
Cerâmico / Esmalte					Esmalte	6,57E-02	9,00E-08
		9,03E-02				8,25E-08	
Cerâmico / Esmalte	[6]	Cerâmico	48	144	7,80E-02	5,34E-08	
					Esmalte	96	288
Cerâmico / Esmalte	[7]	Cerâmico	12	36,5			
					Esmalte	24	73
Cerâmico / Esmalte	[7]	Cerâmico	12	36,5			
					Esmalte	24	73
Cerâmico / Esmalte	[7]	Cerâmico	12	36,5			
					Esmalte	24	73

2.2. Ensaio abrasivos

Como referido anteriormente, existe uma grande dificuldade em reproduzir as condições reais, dadas as variações de temperaturas e acidez existentes na cavidade oral bem como a complexidade de movimentos durante a mastigação. Estas condições levam a que alguns simuladores sejam pouco disponíveis devido a sua complexidade e elevado custo.

Apesar da grande diversidade de equipamentos para testes de desgaste, não existem normas rígidas sobre os ensaios. O guia fornecido pela *International Organization for Standardization* (ISO), intitulado “Dental Material, Guidance on testing of wear. Part 2. Wear by two-and/or three-body contact. Technical Specification”, número 14569-2 de 2001 [8], incide apenas numa descrição técnica dos procedimentos, não avaliando nem evidenciando nenhuma das vantagens ou desvantagens dos ensaios ou dos seus procedimentos.

Apesar de todos os ensaios referidos na Norma número 14569-2, simularem o desgaste por abrasão, é possível desde logo diferenciar dois grupos diferentes de ensaios: Testes de desgaste com contacto a dois corpos e testes de desgaste com contacto a três corpos [9], [10].

O desgaste abrasivo pode ser dividido em abrasão a dois corpos ou a três corpos [1], este desgaste abrasivo ocorre quando uma superfície de um material com elevada dureza perde partículas presas entre superfícies e deforma plasticamente ou corta a superfície como resultado do movimento. Em geral o desgaste abrasivo é proporcional à dureza dos materiais em contacto, à geometria das partículas abrasivas, à carga e à distância de contacto.

2.2.1. Abrasão a dois corpos

A abrasão a dois corpos acontece quando promovido o contacto e movimento entre duas superfícies. A nível microscópico as superfícies nunca são absolutamente lisas, e portanto quando sujeitas ao contacto, as suas rugosidades podem deformar ou partir provocando assim o desgaste. Os ensaios com abrasão a dois corpos utilizam ainda água como lubrificante mas este não é tido em conta como terceiro corpo uma vez que não provoca abrasão.

Este tipo de abrasão acontece *in vivo*, maioritariamente durante os movimentos não masticatórios e nos movimentos parafuncionais [9].

Os métodos de desgaste de Munich (desenvolvido na Maximilian University em Munich), Ivoclar (desenvolvido pela Ivoclar Vivadente) e Zurich (desenvolvido na Universidade de Zurich) são exemplos de testes de desgaste abrasivo a dois corpos, apesar de terem procedimentos bastante díspares. Tanto; o número de ciclos, comprimento de contacto e até o dispositivo de simulação, são distintos para cada método [11]. Na Tabela 2.2 expõe-se as principais características de cada um destes e outros métodos referenciados na bibliografia.

Tabela 2.2. Características de testes de desgaste a dois corpos [2] [8] [11].

Método de desgaste	Força normal [N]	Antagonista	Movimento	Medium	Número de ciclo [×1000]
Munich	49	Cerâmica de óxido de alumínio	Deslizamento (8 mm)	Água	50
Ivoclar		Leucite cerâmica reforçada	Deslizamento (0,7 mm)		120
Zurich	49	Esmalte dentário	Impacto + deslizamento da amostra		120 640 360 1200
DIN	-	Alumina (Al ₂ O ₃)	Deslizamento		-
Freiburg	-	Alumina (Al ₂ O ₃)			
Minnesota	13,35	Dente			250
Newcastle	-	Estatite ou esmalte dentário			-

2.2.2. Abrasão a três corpos

A abrasão a três corpos surge quando as superfícies são colocadas em contacto com a intervenção de uma solução de partículas abrasivas que simulam o desgaste provocado pela comida em situações *in vivo*. A pressão entre as superfícies é transferida para as partículas que por sua vez quebram as rugosidades provocando desgaste.

Na cavidade oral este tipo de desgaste ocorre durante a mastigação e é prevalente em pacientes com uma dieta abrasiva [9]. A erosão dentária pode ser classificada de várias maneiras, sendo que a mais comum é a classificação segundo a etiologia, em que a erosão é denominada extrínseca, intrínseca ou idiopática. A dieta abrasiva é então um dos meios de erosão extrínseca, e é resultado da ação de ácidos exógenos. Os ácidos provenientes da dieta são os principais fatores etiológicos para este tipo de erosão, sendo os mais frequentemente ingeridos provenientes de frutas, sumos de frutas e refrigerantes [12].

São exemplos de teste abrasivo a três corpos os métodos: ACTA (desenvolvido no Dental College em Amesterdão, ACTA - Academisch Centrum Tandheelkunde Amsterdam), Alabama (desenvolvido na Universidade de Alabama nos USA) e o OHSO (desenvolvido na Oral Health and Science University, em Portland USA).

Na Tabela 2.3 expõem-se as principais características de cada um destes métodos referenciados na bibliografia. Note-se que, por vezes, alguns destes métodos (incluindo os de abrasão a dois corpos) são adaptados e algumas das suas características como a carga ou o número de ciclos podem ser alterados.

Tabela 2.3. Características de testes de desgaste a três corpos [8] [11].

Método de desgaste	Força normal [N]	Antagonista	Movimento	Solução abrasiva	Número de ciclos [×1000]
OHSU	20	Esmalte dentário	Impacto + deslizamento (6 mm)	Sementes de papoila ou PMMA	50
ACTA	15	Aço ou material dentário	Deslizamento (duas rodas metálicas contra amostra)	Sementes de milhete ou arroz.	200
Alabama	75	Polyacetel	Impacto + deslizamento.	Partículas de PMMA	400

2.2.3. Soluções Abrasivas

Nos ensaios abrasivos a três corpos as soluções abrasivas mais utilizadas são:

- Sementes de papoila;
- Sementes de milhete;
- Partículas de PMMA.

A utilização destas partículas como solução abrasiva advém de uma publicação de de Gee em 1986 [13] que comparou os índices de desgaste produzidos pelas diferentes sementes e pelo acrílico, utilizando o dispositivo de desgaste ACTA. De Gee determinou que usando uma mistura de 80% sementes de milhete e 20% de PMMA se obtinham valores de desgaste mais próximos dos obtidos *in vivo*. Mais tarde, Leinfelder e Suzuki [14] utilizaram apenas as partículas de PMMA como abrasivo uma vez que estas não se degradam como as sementes de milhete e ainda aceleram o processo de desgaste. Condon e Ferracane [15] introduziram então as sementes de papoila como substitutas das sementes de milhete originalmente sugeridas por de Gee. Desde então diferentes partículas abrasivas têm sido examinadas, incluindo hidroxiapatita, carbetto de silício [16] e fosfato de cálcio [17]. Microesferas de vidro têm também sido utilizadas como corpo abrasivo na indústria de modo a acelerar os testes de desgaste [18].

Apesar de o efeito das partículas abrasivas no desgaste de compósitos não ter sido diretamente estudado, foram avaliados alguns métodos que comportam o uso de diferentes abrasivos. Dois estudos realizados por Heinzte *et al.* [19] [20] comparando os métodos abrasivos ACTA, Alabama e OHSU que usam milhete, PMMA e sementes de papoila respectivamente como abrasivos, determinaram que o desgaste dos materiais compósitos varia significativamente entre métodos de teste.

2.2.4. Antagonistas

Não existe um consenso na bibliografia sobre que material deve ser usado como antagonista em testes de simulação de desgaste. Alguns métodos de simulação usam esmalte, mas mesmo nesses existem diferenças nas preparações efetuadas. Enquanto no método OHSU o esmalte do antagonista é preparado com uma forma normalizada e seguidamente polido, no método Zurich o esmalte é apenas normalizado pela escolha de um molar e

seguidamente limpo com uma escova rotativa de nylon. Assim pode haver diferenças relevantes na forma, no teor de fluor na superfície externa e quantidade de esmalte aprismático tendo estes dois últimos parâmetros influência na dureza do esmalte.

Já o método Munich usa um material que consiste, principalmente, num óxido de alumínio altamente condensado. Este material foi adotado pois testes revelaram um desgaste de antagonistas deste material, muito similar ao encontrado para cúspides palatinas dos molares superiores.

O método Ivoclar, por sua vez usa o cerâmico IPS Empress para os testes de desgaste. Recentemente foi relatado que antagonistas deste material produzem desgaste, em vários compósitos, semelhante ao de antagonistas de esmalte. No entanto para testar materiais cerâmicos, no que diz respeito ao desgaste do antagonista, este pode não ser um bom substituto para o esmalte.

Existem ainda referências na bibliografia de testes onde são usadas esferas aço, poliacetal, vidro ou o dente completo como antagonistas [1] [2].

2.2.5. Simuladores de desgaste

Com a grande diversidade de métodos de ensaios abrasivos advém também uma grande diversidade de equipamentos para as simulações, onde em algumas situações os laboratórios de investigação acabam por desenvolver os seus próprios equipamentos de teste.

Seguidamente são apresentados alguns dos mais reconhecidos equipamentos de simulação de desgaste abrasivo para materiais dentários [2].

O simulador CoCoM utilizado na universidade de Zurich é o único indisponível no mercado, e para o qual foram avaliados e publicados os valores da força, distância de contacto e temperatura da água. Um problema deste simulador de desgaste é a borracha que simula o ligamento periodontal e produz um movimento de deslizamento da amostra, levando assim a um efeito amaciador durante a simulação do desgaste. Kunzelmann [2] [21] destacou que o movimento de deslizamento era muito dependente de onde a amostra é montada na câmara, isto significa que um desvio de 1 mm a partir do centro pode resultar em um movimento de inclinação em vez de um movimento de deslizamento.

O equipamento utilizado no teste OHSU também apresenta algumas falhas, uma vez que não tem um sensor de força integrado e as forças para abrasão podem variar entre 17 e 19 N de um equipamento para outro. Além disso a distância de deslizamento pode variar

entre 5,36 e 6,24 mm provocando assim uma variação no tempo de contacto. Este equipamento tem sido reestruturado várias vezes nos últimos 10 anos.

O dispositivo ACTA usa um *design* destinto dos restantes aqui mencionados. É constituído por duas rodas metálicas que rodam em direcções diferentes com uma diferença de cerca de 15% na velocidade circunferencial estando próximas uma da outra. A amostra é posicionada numa das rodas enquanto a outra trabalha como antagonista. A força de contacto entre os discos é ajustada com pesos ou molas.

O simulador MTS é o único equipamento com um sensor de força incorporado com uma taxa de aquisição de 4600 Hz. O atuador hidráulico produz uma força que é controlada dentro dos limites na elevação/descida e movimentos laterais. O simulador de mastigação MTS é uma versão adaptada do dispositivo MTS, que é amplamente utilizado para o teste biomecânico de quadris artificiais joelhos e implantes.

O simulador Alabama, desenvolvido nessa mesma universidade, usa molas para gerar a força apropriada. Para calibrar cada mola, recorre-se a uma célula de carga e a uma carga de 200 kg em conjunto com uma máquina de ensaio universal antes do ensaio, mas não existem registos no que concerne a desvios, dispersão de resultados, intervalos de tempo de medição, força ou frequência de substituição da mola.

Por último o simulador Willytec, pode ser considerado como um dispositivo que, em geral, satisfaz os requisitos estritos definidos pelo GLP ou FDA para equipamentos laboratoriais. Este equipamento encontra-se disponível no mercado desde 1997, no entanto existem poucas publicações sobre o uso deste simulador para avaliar o desgaste de materiais dentários. Neste equipamento, a princípio, a carga é produzida por pesos, que são montados sobre uma barra que é acionada por um motor controlado por computador, por meio de controladores lógicos programáveis. O simulador contém oito camaras de teste, cada uma com uma barra e o peso individual, estando por sua vez todas ligadas por uma barra transversal. O motor permite também produzir movimentos laterais. Além disso o simulador compreende um sistema de ciclos térmicos [2].

2.3. Materiais de restauração dentária

Dentro dos materiais de restauração dentária direta, os mais utilizados atualmente são a amálgama e as resinas compósitas [1].

A amálgama continua a ser o mais importante material de restauração dentária, apesar da aparência e da sua associação com toxicidade e problemas de higiene. Estima-se que nos Estados Unidos a amálgama seja usada em aproximadamente 60% das restaurações dentárias. A amálgama é uma substância complexa com uma estrutura, propriedades e comportamento clínico muito influenciado pela manipulação do material.

A amálgama é formada quando se mistura mercúrio com outros metais. O mercúrio encontra-se em estado líquido à temperatura ambiente e reage facilmente com metais como prata, estanho ou cobre produzindo materiais sólidos. Existem controvérsias sobre qual comportamento clínico e propriedades dos materiais fundamentais da amálgama surgem de relações causa-efeito direta. As ligas de amálgamas são normalmente classificadas como de alto ou baixo cobre. Na Tabela 2.4 é possível ver a constituição típica da amálgama.

Tabela 2.4. Constituição típica de amálgama dental.

Constituinte	Total [%]
Ag	67 –
Sn	25 – 28
Cu	0 – 6
Zn	0 – 2
Hg	0 – 3

Os materiais compósitos são tanto um conceito de engenharia como um material específico. O termo corrente compósito surge da indústria aeronáutica no início do século passado. Recentemente, tem havido um interesse renovado em tais compostos, desde que pode ser escolhida a matriz de resina adequada, com o material a apresentar estabilidade adequada durante a vida útil.

Por definição materiais compósitos, também referidos apenas como compósitos, são concebidos por dois ou mais materiais constituintes com propriedades físicas ou

químicas significativamente distintas que permanecem separadas à escala macroscópica ou microscópica dentro da estrutura acabada.

Os tecidos dentários duros, principalmente esmalte e dentina, são materiais compósitos naturais. Em medicina dentária e sobre materiais de restauração dentária, o termo compósito é normalmente usado para designar um importante subgrupo de materiais de restauração dentária. O termo compósito é uma abreviatura de compósito de resina, ou polímero/cerâmico compósito.

Estes materiais com base em resina, usados em materiais de restauração dentária têm três principais componentes; uma matriz de resina, um material de enchimento/reforço e um agente de acoplamento. A resina forma a matriz do material compósito e liga os restantes componentes do composto, ou seja, o reforço do material ou materiais de enchimento, e o agente de acoplamento liga a matriz de resina e os agentes de enchimento.

O aumento da substituição da amálgama pelos compósitos devido a razões estéticas levou ao aparecimento de muitos sistemas de compósitos de resinas no mercado. As alternativas e desenvolvimentos são muitos, fibras pequenas, partículas de reforço, nano-cargas, etc. Portanto, para manter em controlo os materiais recentemente desenvolvidos e categorizar outros, várias classificações têm sido propostas. A maioria das classificações de compósitos de resina baseia-se no tamanho e/ou distribuição do tamanho de partículas. A Tabela 2.5 identifica os compósitos em seis grupos principais.

Tabela 2.5. Classificação de compósitos de resinas segundo, tamanho de partícula, distribuição do tamanho de partícula e aplicação clínica [1].

Classe do compósito	Tamanho de partícula	Distribuição de tamanho de partícula	Aplicação clínica
Tradicional	Grandes	1 – 50 μm vidro	Áreas de elevada tensão
Híbridos	Grandes	1 – 20 μm vidro 0,04 μm sílica	Áreas de elevada tensão que requerem melhoria de polimento
	Médio-particulado	0,1 – 20 μm vidro 0,04 μm sílica	Áreas de elevada tensão que requerem melhoria de polimento
	Médio-particulado/ pequenas	0,1 – 20 μm vidro 0,004 μm sílica	Áreas de tensão moderada que requerem polimento ideal
Híbrido compactável	Médio-particulado / mini-particulado	Híbrido médio-particulado / mini-particulado, com pouca fração de enchimento	Situação que requer melhoria da condensabilidade
Hidro-fluidos	Médio-particulado	Híbrido médio-particulado, mas com distribuição de tamanho de partículas mais fina	Situação em que melhorar o fluxo é necessário e / ou onde o acesso é difícil
Homogêneos	Micro-particulado	0,04 μm sílica	Áreas sub-gengivais e de reduzida tensão que requerem brilho e polimento
Heterogêneos	Micro-particulado	0,04 μm sílica Partículas de resina pré-polimerizada contendo 0,04 μm sílica	Áreas sub-gengivais e de reduzida tensão onde é necessário reduzir a contração

Compósitos tradicionais - Compósitos tradicionais também referidos como convencionais ou macro-particulados são constituídos por grandes partículas de reforço, sendo o quartzo e sílica amorfa finamente moída os materiais mais usados. Estes compósitos contêm partículas vidro com tamanho médio de 10 a 20 μm e as partículas maiores com 50 μm e são caracterizadas pela grande distribuição no tamanho das partículas. Devido à inclusão de partículas tão grandes o acabamento da superfície é pobre e, em deslizamento, pode ser removida alguma resina.

Compósitos micro-particulados – Estes compósitos contêm partículas de sílica num intervalo de 0,01 a 0,1 μm com uma dimensão média de 0,04 μm . Este valor é um décimo do comprimento de onda da luz visível e 200 a 300 vezes menor do que as partículas média em compósitos tradicionais.

Devido ao tamanho médio das partículas estes compósitos apresentam superfícies lisas, muito similares às obtidas para resinas acrílicas sem enchimento.

O tamanho muito pequeno destas partículas produz um grande aumento na área de superfície disponível para um determinado volume de enchimento. Consequentemente, não é possível incorporar cargas de enchimento elevadas para partículas pequenas. Os compósitos micro-particulados, apesar de terem fração volúmica de partículas de enchimento inorgânicas muito menor que os compósitos tradicionais, não vão contrair tanto quanto seria de esperar. A desvantagem destes compósitos é ligação relativamente fraca entre as partículas e matriz, facilitando o desgaste.

Compósitos híbridos – Os compósitos híbridos contêm dois tipos de partículas de enchimento, partículas grandes com tamanho médio de 15 - 20 μm e também pequena percentagem em massa de sílica coloidal, com tamanho médio de 0,01 a 0,05 μm . Embora quase todos os compósitos contenham pequenas percentagens desta sílica coloidal, o seu comportamento é muito determinado pelo tamanho das partículas de enchimento maiores. Este material foi desenvolvido com objetivo de obter um melhor acabamento superficial do que o conseguido em compósitos com partículas pequenas, mas mantendo as boas propriedades mecânicas. Esta categoria de compósitos tem um acabamento superficial semelhante aos compósitos micro-particulados.

Quanto as propriedades físicas e mecânicas, estes normalmente estão entre os compósitos tradicionais e os de pequenas partículas e são superiores aos micro-particulados.

Hidro-fluidos – Estes compósitos têm um teor de carga reduzida, a fim de proporcionar a consistência adequada para permitir que o material se adaptar uniformemente à cavidade e produzir a forma dental desejada. Estes compósitos são resultado da modificação dos compósitos híbridos e de partículas pequenas. Embora a redução de material inorgânico permita a sua baixa viscosidade também os torna mais suscetíveis ao

desgaste. Estes compósitos são indicados para aplicações em que é necessário um certo grau de adaptação.

Compósitos compactáveis - Também denominados compósitos condensáveis, são uma categoria especial dos compósitos híbridos. Estes compósitos de restauração direta são os mais adaptados para restaurações de dentes posteriores. Quando comparados à amálgama, a colocação deste material é mais morosa e complicada.

Este compósito foi introduzido no mercado como solução para problemas como a contração, desgaste e manuseamento. Foram erradamente chamados de compósitos condensáveis apesar de não condensarem. Estes oferecem alta viscosidade, tentando reproduzir as técnicas de colocação da amálgama. Ao contrário dos híbridos convencionais, esta categoria de compósitos à base de resina é relativamente resistente ao deslocamento durante a inserção.

Os compósitos cerâmicos ou de resinas como biomateriais podem ainda não ter atingido o limite do seu potencial, pois os atuais compósitos não conseguem ainda resistir totalmente ao ambiente agressivo da cavidade oral [22].

3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS

O presente capítulo está dividido em três partes, e tem como objetivo a apresentação de todos os materiais, equipamentos e procedimentos, estando alguns destes já determinados e referenciados em estudos anteriores.

A primeira parte inclui uma pequena descrição do compósito em estudo, e seu processo de cura, bem como a caracterização do antagonista e das soluções abrasivas selecionadas para o estudo.

Na segunda parte são descritos os equipamentos utilizados nos testes de abrasão e na análise dos resultados obtidos. Nos ensaios tribológicos é crucial definir os procedimentos e parâmetros a utilizar, de modo a ser viável a comparação dos resultados obtidos.

Por último, este capítulo contempla o planeamento e procedimento dos ensaios de desgaste abrasivo efetuados.

3.1. Materiais

3.1.1. Compósito Synergy Compact

O material compósito usado no estudo foi o Synergy Compact (Coltene Whaledent), pertencente à classe dos híbridos, constituído por uma matriz de Metil metacrilato, reforçada com partículas de Estrôncio, Bário e Sílica com tamanho médio de 0,6 μm , e fração volúmica de 59% [23].

Os provetes foram produzidos segundo um procedimento definido por um estudo anterior [10]. Um molde de alumínio foi utilizado para produzir os provetes do compósito em forma de “disco” com 10 mm de diâmetro e 2 mm de espessura. O molde foi colocado sobre uma película de acetato e juntamente sobrepostos sobre uma placa de vidro, sendo seguidamente preenchido manualmente com um ligeiro excesso de compósito e coberto do mesmo modo que a face inferior. Antes de prosseguir com polimerização, a amostra do compósito foi compactada manualmente, através da aplicação de pressão com os dedos sobre

o vidro superior. Um polimerizador, Kerr Optilux 501, foi utilizado para este processo. Segundo a descrição técnica do fabricante, a faixa de comprimento de onda de saída da luz de cura varia entre 400-510 nm, e uma de intensidade mínima de luz de 850 mW/cm², usando um guia de luz de tubo curvo de 8 mm. A ponta do guia de luz foi colocada em contacto com o vidro superior, de modo a garantir eficiência de cura. O tempo de cura utilizado foi de 40 segundos.

Após, 7 dias do processo de polimerização, e, por forma a garantir a cura completa, os provetes foram alvo de um tratamento superficial de polimento, até as amostras obterem a mínima rugosidade possível, para seguidamente serem alvo de um teste de microdureza Vickers, utilizando um equipamento Struers Duramin, aplicando uma carga de 1,962 N durante 40 s. A dureza foi medida diretamente na superfície exposta à luz de polimerização. Foram feitas 10 indentações em cada provete.

As propriedades mecânicas do compósito Synergy são representadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Propriedades mecânicas do compósito e respetivos desvios padrão (DP) [1].

Compósito	Dureza [MPa] (DP)	Resistência à flexão [MPa] (DP)	Trabalho à fratura [J/m²] (DP)	Módulo de elasticidade dinâmico [GPa] (DP)	Módulo de elasticidade estático [GPa] (DP)
Synergy Compact	604 (20,46)	58,78 (7,95)	2,24×10 ³ (150,32)	15,5 (1,10)	8,94 (0,86)

Na Figura 3.1 é possível observar alguns provetes de compósito Synergy Compact antes e após a realização dos ensaios de desgaste abrasivo.



Figura 3.1. Provetes Synergy Compact antes e após ensaio abrasivo.

3.1.2. Material antagonista

De todos os antagonistas descritos anteriormente na bibliografia, foi adotado para este estudo, a esfera de vidro, devido à sua dureza bastante semelhante à do esmalte dos dentes, pelo facto de não ocorrer a produção de óxidos e por as suas propriedades não variarem tanto como materiais biológicos, Figura 3.2.



Figura 3.2. Antagonista, esfera de vidro e suporte.

As esferas de vidro utilizadas como antagonistas têm um raio de 5 mm, devido a este ser o raio de curvatura normalmente encontrado nos molares.

A Tabela 3.2 apresenta as características físicas e dimensionais das esferas de vidro, normalizadas de acordo com a DIN 5401 parte II.

Tabela 3.2. Características físicas e dimensionais das esferas de vidro [1].

Material	Densidade [kg/m³]	Dureza [MPa] (DP)	Diâmetro médio [mm]	Tolerância [μm]
Vidro	2500	5131 (84,6)	10	14

3.1.3. Soluções abrasivas

Como a influência das soluções abrasivas no desgaste de materiais de restauração dentária é o alvo principal deste estudo, este tópico foi um dos primeiros a ser definido. As partículas abrasivas selecionadas foram: zeoesferas de vidro, partículas de PMMA e sementes de papoila, Figura 3.3.

**Figura 3.3.** Abrasivos: zeoesferas, PMMA e sementes de papoila.

A primeira solução abrasiva utilizada foi uma mistura aquosa de microesferas de vidro de diâmetro aproximado de 4 μm (zeospheres). A solução é constituída por 35 g de microesferas por cada 100 ml de água destilada, o que corresponde a uma fração volúmica de 13% e uma fração mássica de 26%, de microesferas. Esta composição estava já definida por um estudo realizado anteriormente [1].

Inicialmente tomou-se a fração mássica desta solução como referência para as restantes, mas esta opção revelou não ser adequada devido a problemas de solubilidade para a solução constituída por partículas de PMMA. Deste modo foi então tomada como referência a fração volúmica. Assim, a segunda solução abrasiva utilizada neste estudo foi uma mistura de partículas de PMMA, inicialmente apenas com água destilada. Esta

composição necessitou de ser alterada devido ao facto das partículas misturadas apenas com água destilada solidificarem num curto espaço de tempo, o que inviabilizava a realização do teste. Após verificada a hipótese de variar a concentração de partículas para contornar o problema, sem sucesso, foi então testada uma nova solução, onde se substituiria na totalidade a água destilada por álcool etílico. Visto que esta alteração resolvia o problema de solubilidade, foi adotada como solução final uma mistura de água destilada, álcool etílico e PMMA.

Por fim foi selecionada uma solução abrasiva de partículas biológicas. Sementes de papoila em porções de 50 g foram trituradas num moinho durante 5 segundos [24], seguidamente foram colocadas na mufla a 60°C durante aproximadamente 7 horas. Após a secagem foram novamente trituradas em porções de 50 g mas agora durante 30 segundos. Também para esta solução foi mantida, inicialmente, a percentagem volúmica de referência, mas após alguns ensaios de caracterização chegou-se à conclusão que a dispersão das partículas na solução e o depósito no fundo do recipiente de ensaio eram muito elevadas, o que levava a valores de desgaste muito pequenos e por vezes imensuráveis. Deste modo optou-se por duplicar a fração volúmica de partículas, garantindo um maior número na zona do contacto.

A Tabela 3.3 especifica os valores de fração volúmica e mássica dos componentes utilizados para cada uma das soluções abrasivas utilizadas neste estudo.

Tabela 3.3. Composição, frações volúmicas e mássicas das soluções abrasivas usadas no estudo.

Solução	Componentes	Fração Volúmica [%]	Fração Mássica [%]
Zoesferas Solução abrasiva 1 (SA-1)	Água destilada	87,0	73,9
	Zoesferas	13,0	26,1
PMMA Solução abrasiva 2 (SA-2)	Água destilada	47,4	41,8
	Álcool	39,5	27,5
	PMMA	13,1	30,6
Semente de papoila Solução abrasiva 3 (SA-3)	Água destilada	73,7	72,6
	Sementes	26,3	27,5

3.2. Equipamentos

3.2.1. Tribómetro para ensaios de desgaste

O tribómetro usado nos ensaios de desgaste, foi construído no Departamento de Engenharia Mecânica, tendo como base um torno mecânico. Para o presente estudo foi selecionado o tipo de teste de desgaste alternativo, com contacto plano-esfera pois é o que melhor simula o contacto entre dente-restauração, e, possibilita variações de amplitude de movimento, carga e ambiente de simulação, Figura 3.4.



Figura 3.4. Tribómetro para ensaios de desgaste com movimento alternativo.

1. Variador de velocidade;
2. Leitor da carga normal aplicada;
3. Torno mecânico;
4. Célula de carga da força normal;
5. Suporte do antagonista;
6. Tubo de ar do agitador;
7. Controladores de posição da base;
8. Recipiente da solução abrasiva;
9. Mola helicoidal de compressão;
10. Carril de escorregamento;
11. Célula de atrito;

Este tipo de contacto foi selecionado para evitar desalinhamentos e também porque permite uma avaliação fácil do desgaste dos dois materiais [25]. O controlo da velocidade de rotação é aplicado por um variador de frequência de rotação.

O tribómetro e respetivos equipamentos de medida encontram-se ligados a um computador, que permite, através de um programa desenvolvido em LabView, registar os valores da força de atrito durante o ensaio, representar um gráfico da evolução da força de atrito, e controlar o tempo de ensaio definindo o número de aquisições desejado. Uma vez

que a aquisição de dados não é contínua durante o ensaio, é necessário definir um tempo ao fim do qual, repetidamente, se faz a medição. Assim o número de aquisições definido no *software* é dado pela razão entre o número de ciclos do ensaio e o intervalo de aquisição desejado. A Figura 3.5 sintetiza o modo como o ciclo de aquisição foi definido de modo a concluir o ensaio ao fim da realização do número de ciclos do ensaio.

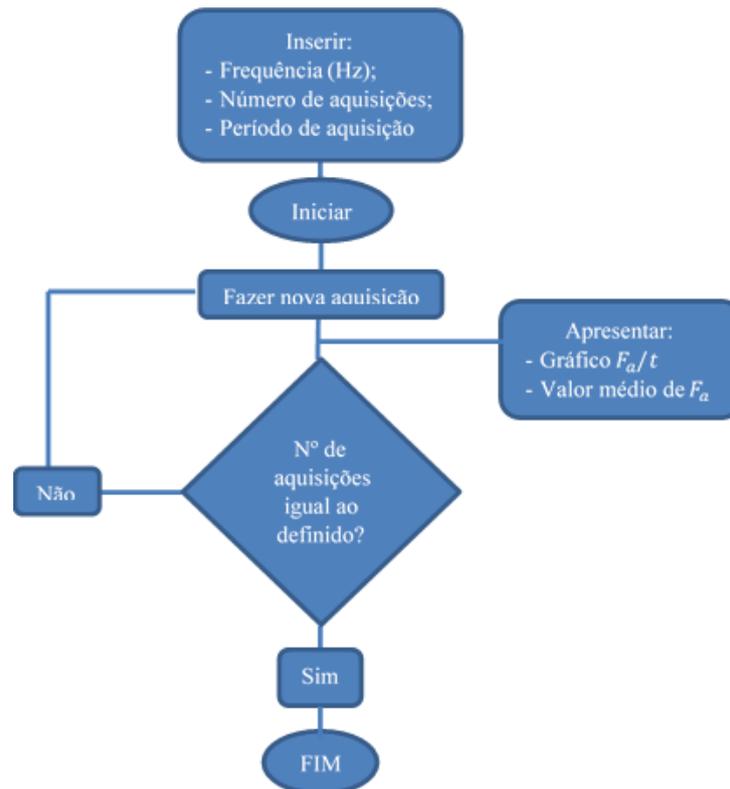


Figura 3.5. Fluxograma esquemático da aquisição de dados no tribómetro.

O contacto estabelecido pelo equipamento é do tipo esfera-plano, sendo o provete de compósito plano e o antagonista a esfera de vidro, envolvidos por uma solução abrasiva, sendo que o provete se encontra em repouso e a esfera por sua vez tem um movimento alternado de amplitude 2,2 mm. A frequência de rotação do veio depende do ensaio a realizar e pode ser de 1 ou 5 Hz.

A força normal é aplicada através de um sistema de mola, e é determinada com precisão através da utilização de uma célula de carga. A força de atrito entre os dois corpos em contacto é medida por uma célula de carga e uma placa de aquisição de dados ligada a um computador. O sistema que permite à célula de carga medir a força de atrito é composto

por uma calha na base do recipiente onde é fixo o provete envolto pela solução abrasiva. Assim permite o deslocamento na direção do movimento de desgaste, e como a célula de carga se encontra imóvel, a força exercida sobre o provete (força de atrito) é registada pela mesma [26]. O equipamento segue a norma ASTM G133 – 95 (2002) [27].

3.2.2. Equipamentos de medida

Para medir o volume removido por desgaste do compósito, recorreu-se a um rugosímetro laser *Rodenstock RM600*. (Optische Werke G. Rodenstock, München, Germany), Figura 3.6.



Figura 3.6. Rugosímetro laser *Rodenstock RM600*.

Este equipamento permite fazer um varrimento de toda a área da marca de desgaste, obtendo um perfil 3-D que permite a determinação do volume de material removido. Para visualização dos dados, análise e processamento foi usado o *software* Gwyddion, este programa é tipicamente utilizado para digitalizar os dados provenientes de técnicas de microscopia de varrimento por sonda, mas também pode ser utilizado para a análise de dados de perfilometria. A Figura 3.7 mostra dois perfis de desgaste de um ensaio com solução abrasiva de zeosferas, obtidos com este *software*.

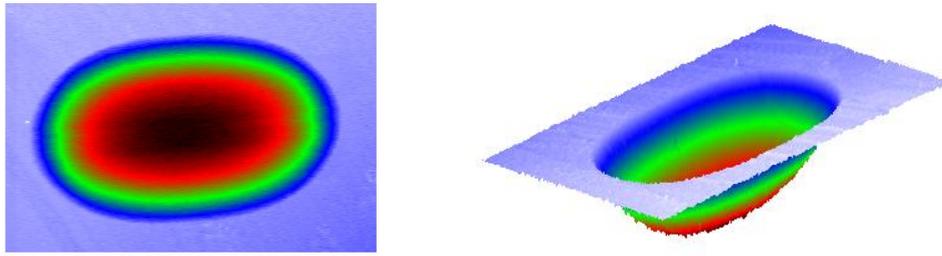


Figura 3.7. Perfis de desgaste de ensaios com zeosferas, obtidos com o *software* Gwyddion.

As medições de desgaste nos antagonistas foram tomadas por microscópio ótico *Mitutoyo Toolmaker's Microscopes*, Figura 3.8, com ampliação de 15x e iluminação com uma lâmpada circular. Este possui um *Microstage*, um sistema de posicionamento do prato de medição, que comporta dois micrômetros digitais, um em cada direção XY (dois graus de liberdade), com precisão de 0,001 mm.

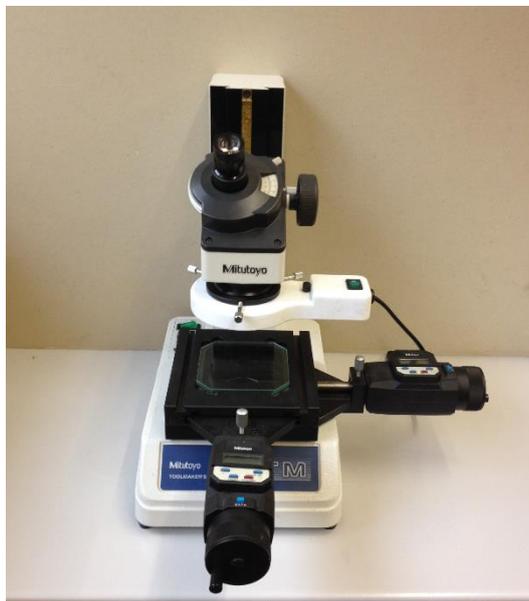


Figura 3.8. Microscópio ótico *Mitutoyo Toolmaker's Microscopes*.

Foram ainda registadas fotograficamente as marcas obtidas nos antagonistas, utilizado um microscópio ótico *Nikon Stereo Photo SMZ – 10* com uma máquina fotográfica *Canon PowerShot A620*. A iluminação é novamente adicionada pela aplicação de uma lâmpada circular. Figura 3.9.



Figura 3.9. Microscópio ótico *Nikon Stereo Photo SMZ* e máquina fotográfica *Canon PowerShot A620*.

As medições de durezas foram realizadas com um durómetro da marca *Struers Duramin*, Figura 3.10. Possui uma resolução máxima de $0,01 \mu\text{m}$, efetua medições em Vickers, Knoop, Brinell e Rockwell. Este equipamento realiza medições de micro e macro – dureza, com intervalo de carga aplicada de 10 – 2000 gf, sistema automático de intercâmbio de cargas. O posicionamento das amostras é controlado por uma mesa de medição micrométrica com dois graus de liberdade.



Figura 3.10. Durómetro Struers Duramin.

A análise da morfologia dos provetes e dos mecanismos de desgaste nos mesmos foi realizada com recurso a um microscópio eletrónico de varrimento, *Philips® XL30 TMP*, Figura 3.11. Possui uma resolução máxima de $3,5 \times 10^{-9}$ m, e análise por espectrometria de dispersão de energia (EDS) *EDAX – Genesis XM2*.



Figura 3.11. Microscópio eletrónico de varrimento.

3.3. Procedimentos

3.3.1. Planeamento dos ensaios

Inicialmente, perante a grande diversidade de parâmetros nos ensaios de desgaste que inviabilizava a verificação experimental da influência de cada um desses parâmetros, foi posta a hipótese da utilização do método estatístico de Taguchi para planejar os ensaios a realizar em função das variáveis em estudo, podendo assim centrar a atenção do estudo nos parâmetros mais importantes.

Mais tarde, após a familiarização com o método, chegou-se a conclusão que este não permitiria obter uma análise adequada devido ao número de níveis desejado para cada parâmetro ser demasiado elevado. Posta de parte a hipótese de utilização do método Taguchi, recorreu-se então a uma abordagem clássica para o planeamento das condições de ensaio para cada solução abrasiva.

Inicialmente foram tomados como parâmetros de referência os valores utilizados em estudos anteriores: 2600 ciclos, para a duração dos ensaios, 5 Newton de carga normal, e, uma fração volúmica de 13% de zeosferas. Realizado o primeiro ensaio, foi medido o volume e altura de desgaste obtido no compósito, e, através da equação de Archard-Czichos (3.1) - que relaciona o volume de desgaste obtido com as condições de carga e duração do ensaio - foi estimado o coeficiente de desgaste da solução abrasiva, k . Seguidamente, e partindo da altura mínima admissível para as marcar de desgaste, foram estimadas uma série de volumes de desgaste, e, novamente usando a equação de Archard-Czichos, estimou-se o número de ciclos e carga a aplicar para obter esses valores de desgaste. O plano de ensaios ficou então definido através um conjunto de ensaios onde o valor da carga aplicada é fixo e se faz apenas variar o número de ciclos, e por um segundo conjunto de ensaios onde se faz o inverso. Estes ensaios foram programados de modo a terem intervalos de severidade (produto entre carga e distância de ensaio) aproximadamente equidistantes. Os ensaios realizados com esta solução abrasiva estão especificados na Tabela 3.4.

$$k = \frac{\text{Volume [mm}^3\text{]}}{\text{Carga [N]} \times \text{Distância[m]}} \quad 3.1$$

Tabela 3.4. Condições dos ensaios abrasivos de microesferas de vidro, Zeosferas, frequência do ensaio, carga normal, duração e severidade.

Solução abrasiva	Freq.	Ref. ensaio	Carga [N]	Número de ciclos [$\times 10^2$]	Severidade [mN]
SA-1 Zeosferas	1 Hz	Z7	5	18	41,4
		Z8		24	55,1
		Z16		26	59,4
		Z9	1	26	11,9
		Z11	2		23,9
		Z15	3		35,9
		Z13	4		47,8
		Z14	5		59,6
		Z22	6		70,8
		Z23	7		84,1
		Z24	8		95,0

Este processo foi repetido para as outras soluções abrasivas, sendo que para reduzir o tempo dos ensaios das partículas PMMA, foi utilizada uma frequência superior (5Hz). Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Condições dos ensaios abrasivos de partículas de PMMA, frequência do ensaio, carga normal, duração e severidade.

Solução abrasiva	Freq.	Ref. ensaio	Carga [N]	Número de ciclos [$\times 10^2$]	Severidade [mN]
SA-2 PMMA	5Hz	P37	5	14	32,6
		P38		35	77,1
		P38.2		68	151,7
		P39		100	229,2
		P39.2		140	312,8
		P40.2	0,5	200	44,6
		P41	1,3		115,0
		P41.2	2,2		197,1
		P42	3		268,6
		P42.2	4		356,8

Para a última solução, apesar do número de ciclos ser bastante elevado, não foi possível realizar os ensaios com frequência superiores, uma vez que esta alteração leva a uma mudança do tipo de lubrificação, estabilizando uma lubrificação hidrodinâmica, que altera os mecanismos de desgaste e conseqüentemente os valores de desgaste obtidos. De tal modo foram apenas realizados os ensaios com menores velocidades, 1 Hz, Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Condições dos ensaios abrasivos de sementes de papoila; frequência do ensaio, carga normal, duração e severidade.

Solução abrasiva	Freq.	Ref. ensaio	Carga [N]	Número de ciclos [$\times 10^2$]	Severidade [mN]
SA-3 Sementes de papoila	1Hz	S46.2	5	50	111,3
		S50		80	175,9
		S51		280	616,9
		S52	6	200	396,7
		S53	9		594,4
		S48	13		860,5

3.3.2. Testes tribológicos

O primeiro passo para a realização dos ensaios foi a preparação dos provetes do compósito. O material compósito foi moldado para se obter os espécimes de forma plana, pelo procedimento anteriormente descrito, seguidamente os provetes foram sujeitos a um tratamento superficial manual com lixa de 340, 600, 1000 e 2500, com passagem contínua de água, até atingir o mínimo de rugosidade possível, para que as propriedades mecânicas pudessem ser testadas. Uma vez que as amostras foram obtidas por moldagem, o excesso de material teve de ser removido de maneira a obter uniformidade de tamanho dos provetes. Durante o processo de acabamento superficial, quando era alterada a lixa, o provete era rodado aproximadamente 90° a fim de eliminar as marcas criadas pela lixa anterior.

De modo a avaliar a influência de diferentes soluções abrasivas, foram utilizadas três, com condições diferentes, e analisados os desgastes obtidos no compósito e no antagonista.

O teste consiste numa esfera de vidro com movimento alternativo em contacto com o material compósito, a solução abrasiva é adicionada ao recipiente que contem o provete de modo a produzir desgaste abrasivo, Figura 3.12.

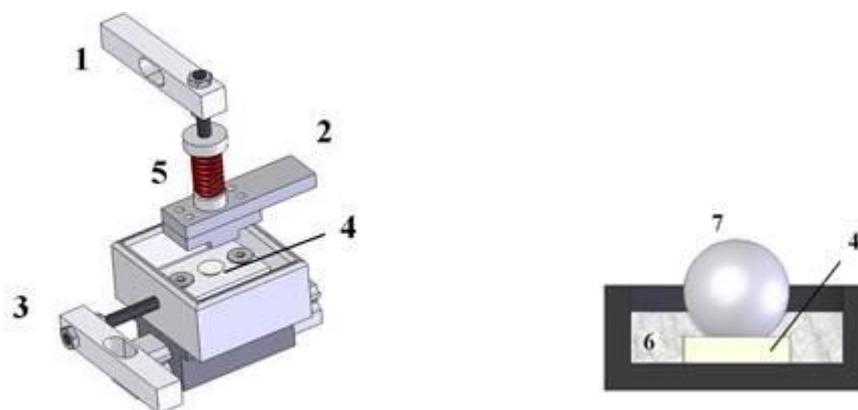


Figura 3.12. Representação do equipamento para ensaios alternativos de contacto esfera-plano.

A esfera (7) está ligada à fase de movimento (2) e é mantida permanentemente em contacto com a superfície horizontal do provete estacionário (4), que se encontra envolto na solução abrasiva (6).

A carga normal é aplicada por uma mola helicoidal de compressão (5), a qual está ligada à célula de carga normal para medir a força aplicada (1). É ainda utilizada uma célula de carga estacionária (3) para registar a força de atrito ao longo do ensaio.

No âmbito do presente estudo, o valor da carga normal aplicada ao contacto entre vidro e o compósito variou entre 1 a 13 N, pois durante o processo de mastigação dos seres humanos, a magnitude da força mastigatória nos intervalos da cavidade oral 3-36 N [3].

Uma onda harmónica, gerada por um mecanismo de excêntrico, impôs um movimento alternativo ao antagonista. A amostra do compósito foi colocada num recipiente que é posteriormente cheio com solução abrasiva. O suporte da amostra inferior está ligado a uma barra de apoio linear para permitir o movimento na direção pretendida.

Os testes tiveram durações de 300 a 28000 ciclos, dependendo da solução em causa. De modo a acelerar o processo de desgaste nas partículas de PMMA, os ensaios dessa solução foram efetuados com uma frequência superior, 5 Hz como especificado anteriormente neste capítulo. Foi ainda adicionada nos ensaios de sementes de papoila, uma bomba pneumática para agitar a solução evitando o depósito das partículas no recipiente.

Através da célula de carga instalada, e de um programa em LabView, foram registados os valores da evolução da força de atrito durante os ensaios uma vez que a energia dissipada por atrito pode ser a maior fonte de energia de desgaste em materiais com contacto de escorregamento. Assim, a energia dissipada pode ser diretamente associada com o desgaste. Segundo Czichos [28], conceitos semelhantes aos de análise termodinâmica são aplicáveis para a análise de desgaste, pelo menos a nível qualitativo. A partir da abordagem energética a dissipação de energia por atrito ao longo do teste é diretamente proporcional ao volume de desgaste [29] [30].

Partindo da abordagem clássica de Archard, Equação 3.2, onde V é o volume de material removido, N a carga normal, x a distância, H a dureza do material e K a constante de desgaste adimensional. Considerando a simplificação proposta por Czichos [28], que agrupa os fatores H e K num novo parâmetro k , tem-se então uma relação do volume em função do novo parâmetro k e da severidade Equação 3.3.

$$V = K \frac{Nx}{H} \quad 3.2$$

$$V = kNx \quad 3.3$$

No entanto o efeito da força normal, N , é difícil de explicar, uma vez que a direção da mesma é perpendicular ao movimento durante todo o ensaio, logo, esta não realiza trabalho. Esta parece ser uma incoerência do modelo de Archard, no entanto este modelo foi definido empiricamente e parece obter valores coerentes na maioria dos estudos experimentais. Isto deve-se ao facto da carga normal determinar o valor da força de atrito, se assumirmos um valor do coeficiente de atrito, μ , constante, no entanto em ensaios onde a força de atrito varia consideravelmente, ou onde a duração não é suficiente para atingir um regime estável, a aproximação do modelo de Archard pode não ser a mais correta.

Considerando então o modelo de Coulomb, onde a força de atrito aparece proporcional a carga normal, as Equações 3.4 e 3.3, surge uma nova relação, Equação 3.5. Onde, k' é o coeficiente de desgaste em função da força de atrito.

$$F_a = \mu N \quad 3.4$$

$$V = \left(\frac{k}{\mu}\right) F_a x = k' F_a x \quad 3.5$$

Esta nova equação é fisicamente consistente, porque estabelece uma proporcionalidade entre o volume removido, que é um *output* do sistema de desgaste, e o trabalho realizado pela força de atrito que é a principal entrada de energia no sistema. No entanto para testes onde a força de atrito varia significativamente, é ainda necessário ter em consideração a variação da força de atrito com o tempo de ensaio, chegando assim às Equações 3.6 e 3.7.

$$V = k' \int_x F(x) dx = k' v \int_t F(t) dt \quad 3.6$$

$$V = k' \sum_i \bar{F} x_i \Delta x_i = k' v \sum_i \bar{F} t_i \Delta t_i \quad 3.7$$

Esta abordagem à aproximação energética encontra-se devidamente expandida e pormenorizada por A. Ramalho e J.C. Miranda (2006) [29].

As amostras do compósito foram digitalizadas após cada teste por um rugosímetro laser Rodenstock RM 600 obtendo um perfil 3-D, com o objetivo de medir o volume de desgaste. Para a visualização de dados, análise e processamento, foi utilizado o *software* Gwyddion. Este programa é tipicamente utilizado para digitalizar os dados

provenientes de técnicas de microscopia de varrimento por sonda, mas também pode ser utilizado para a análise de dados de perfilometria [31].

O volume de desgaste do antagonista - esfera de vidro – surge com forma de calote esférica, foi então utilizado o microscópio ótico *Mitutoyo Toolmaker's Microscopes* descrito anteriormente, para a medição do raio, r , da marca de desgaste em duas direções ortogonais: a direção do movimento, r_1 , e a direção perpendicular, r_2 . Figura 3.13.

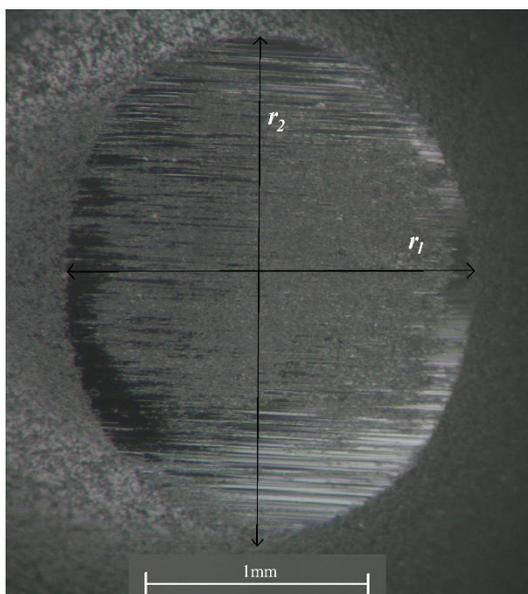


Figura 3.13. Exemplo de marca de desgaste no antagonista.

Os valores médios de cratera, bem como o raio da esfera, R , foram então utilizadas para calcular a profundidade, h , e o volume, V , do material removido, utilizando as equações apropriadas, Equações 3.8 e 3.9, [32].

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \quad 3.8$$

$$V = \frac{\pi}{3} h^2 (3R - h) \quad 3.9$$

Por fim foram ainda fotografados as marcas de desgaste provocado nos antagonistas com recurso a um microscópio *Nikon Stereo Photo SMZ* e a uma câmara fotográfica *Cannon PowerShot A620* também descritos anteriormente.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Estudos prévios

Antes de iniciar a realização dos ensaios previstos, foram testadas algumas hipóteses para verificação da influência de alguns parâmetros nos resultados de desgaste abrasivo.

Primeiramente foram realizados 3 ensaios com solução abrasiva de zeosferas a uma frequência de 3 e 5 Hz para verificar a influência da velocidade do ensaio nos resultados de desgaste. Estes ensaios indicaram que o aumento da frequência não tinha influência direta nos valores obtidos de desgaste, para a solução abrasiva em causa. Observando a Figura 4.1 foi possível verificar que os valores obtidos se adaptam à dispersão de pontos obtida para ensaios a 1Hz.

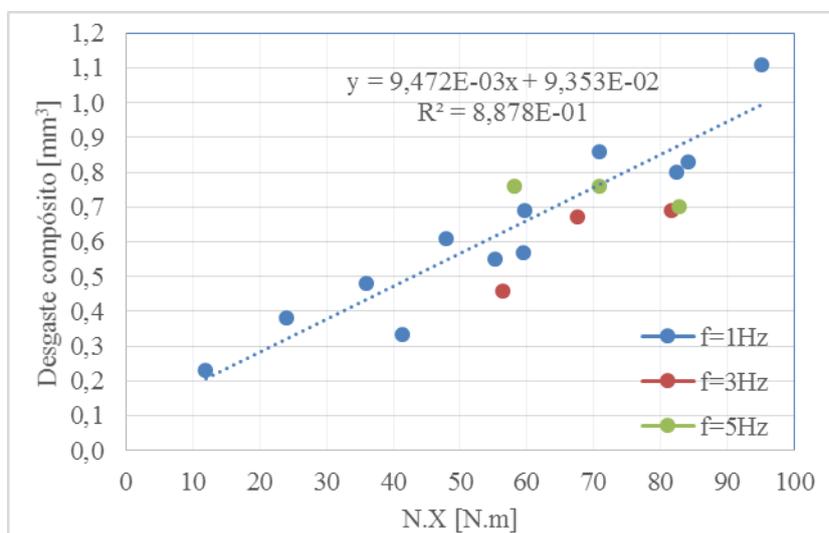


Figura 4.1. Influência da velocidade do ensaio no desgaste do compósito, para a solução abrasiva de zeosferas.

Apesar das conclusões retiradas inicialmente, verificou-se mais tarde, que para a solução abrasiva de sementes de papoila, esta hipótese não era válida, uma vez que o aumento da velocidade altera o tipo de lubrificação, estabilizando uma lubrificação hidrodinâmica, o que induz alteração do mecanismo de desgaste e consequentemente os

valores e forma dos desgastes obtidos. Devido às condições de ensaio, frequência elevada e viscosidade da solução ocorria perda de contacto entre as superfícies devido há existência de uma camada de solução abrasiva que impedia o seu contacto. Para condições de ensaio longas o valor do desgaste não aumentava. Após a análise dos perfis transversais do contacto foi possível observar que não ocorria desgaste na zona central do desgaste, ocorrendo um desgaste elevado nos locais de mudança de direção do deslocamento, Figura 4.2.

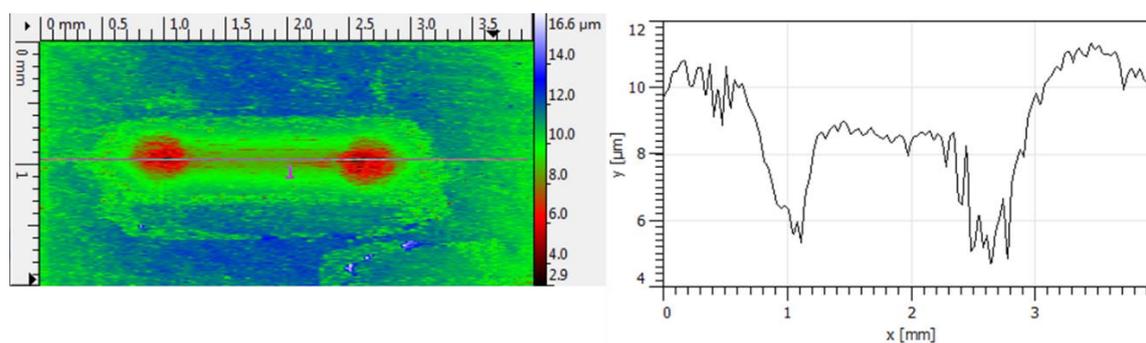


Figura 4.2.Perfi de desgaste obtido com solução abrasiva de sementes de papoila num ensaio com frequência de 5 Hz, 5 N e 50000 ciclos.

Foram ainda realizados 3 ensaios, com solução abrasiva de sementes de papoila, nos quais se tencionava verificar se a variação de concentração de partículas tinha também algum efeito nos resultados. Mas como é possível verificar pela análise da Figura 4.3 nenhuma relação foi encontrada entre a variação da fração volúmica e o desgaste obtido.

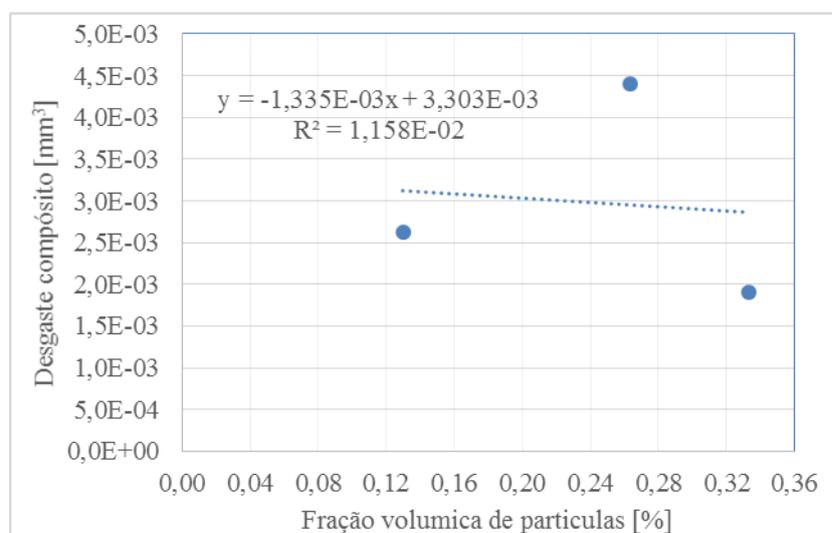


Figura 4.3. Volume de desgaste do compósito em função da fração volúmica de sementes de papoila.

4.2. Apresentação de resultados

O objetivo do presente estudo foi verificar a influência das soluções abrasivas no desgaste de materiais de restauração dentária e encontrar uma correlação entre elas. Para tal foi necessário analisar a variação de alguns parâmetros como o volume de desgaste do compósito e antagonistas em função da severidade, da carga, da distância de contacto e da energia dissipada.

Segue-se então a demonstração dos resultados obtidos, comparando cada um destes fatores para as três soluções.

O primeiro parâmetro alvo de análise foi o volume de desgaste do compósito e respetivo antagonista com a severidade, para as diferentes soluções abrasivas.

Como foi possível verificar pela análise da Figura 4.4 os volumes de desgaste do compósito e do antagonista, nos ensaios com solução abrasiva de zeosferas, evoluem de forma semelhante com o aumento da severidade, tendo ambos uma boa correlação, apresentando valores de R^2 próximos de 0,9. Note-se que o declive da reta de desgaste do compósito é 1,36 vezes superior ao do antagonista, o que indicou que o desgaste do compósito é superior ao do antagonista.

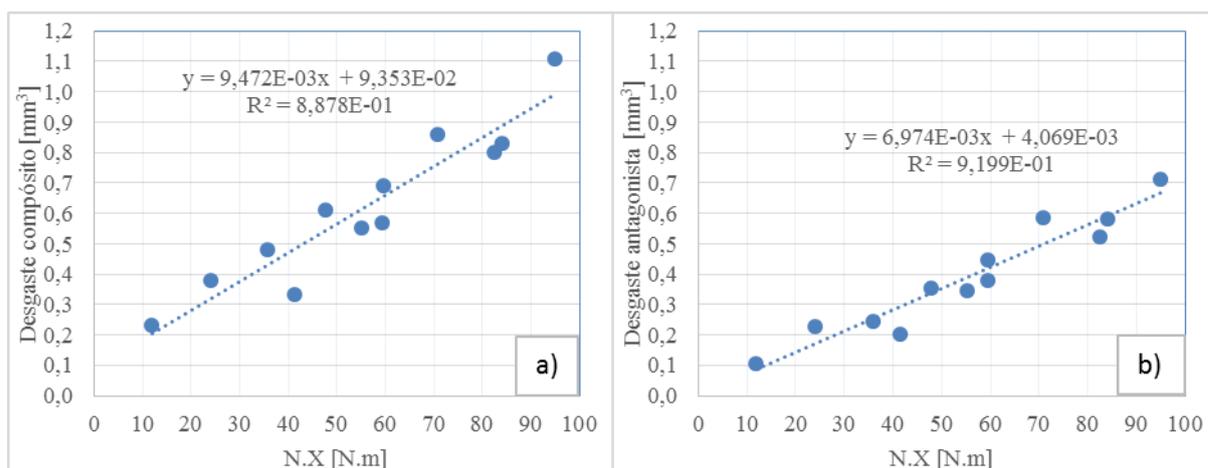


Figura 4.4. a) Volumes de desgaste de: a) compósito, e, b) antagonista, para uma solução abrasiva de zeosferas.

O mesmo não se verificou quando se teve em atenção os ensaios efetuados com as partículas de PMMA. Neste caso o declive da reta de tendência do volume removido de compósito foi aproximadamente 4 vezes superior ao do antagonista, o que indicou uma diferença entre o aumento de desgaste do compósito e do antagonista muito superior à solução abrasiva anterior. Note-se que neste caso os volumes de desgaste do compósito apresentaram uma maior dispersão, e que foram ainda identificáveis dois pontos que ficam bastante deslocados dos restantes, estes são os valores correspondentes aos ensaios de menor carga (P40.2 e P41), Figura 4.5. Estes pontos apresentam um desvio significativo da linha de tendência, possivelmente devido à carga normal utilizada ser muito baixa, o que poderia levar a uma alteração do mecanismo de desgaste. Os dois últimos pontos do gráfico a), Figura 4.5, apresentam um comportamento diverso pois com o aumento da severidade existe uma diminuição do volume de desgaste do compósito, esta situação deve ocorrer por alteração de mecanismo de desgaste. Esta hipótese será avaliada posteriormente, através da análise microscópica à morfologia das superfícies de desgaste.

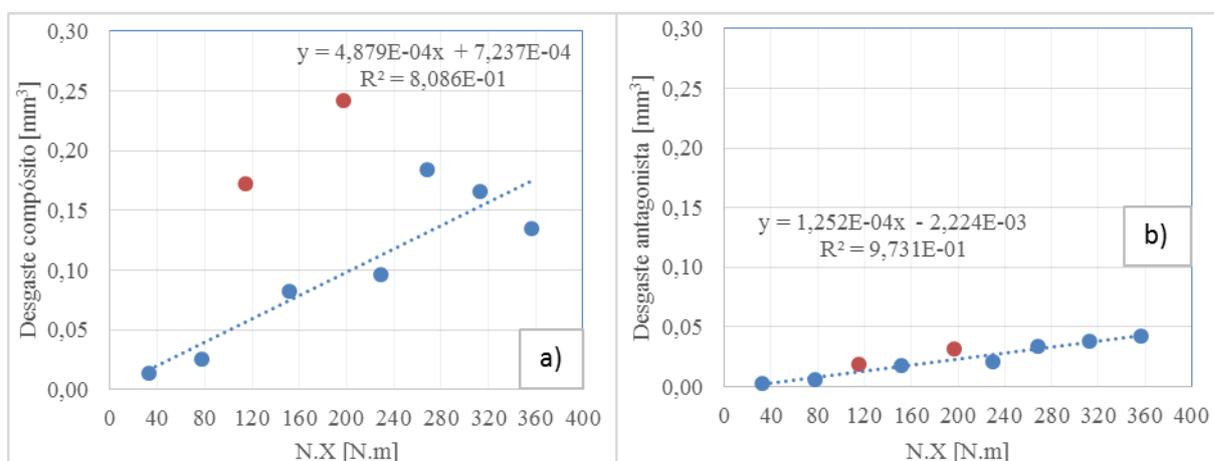


Figura 4.5. Volumes de desgaste de: a) compósito, e, b) antagonista, para uma solução abrasiva de PMMA.

Os ensaios com solução abrasiva de sementes de papoila apresentaram valores de desgaste, quer para compósito quer para antagonista, bastante regulares com o aumento da severidade, apresentando valores de correlação acima de 0,9, apesar do aumento do desgaste no antagonista ter sido muito inferior, uma vez que o declive da sua reta de tendência é aproximadamente 3 vezes inferior à do compósito, o que indicou que este não é tão afetado pela severidade do ensaio, como foi observável pela Figura 4.6.

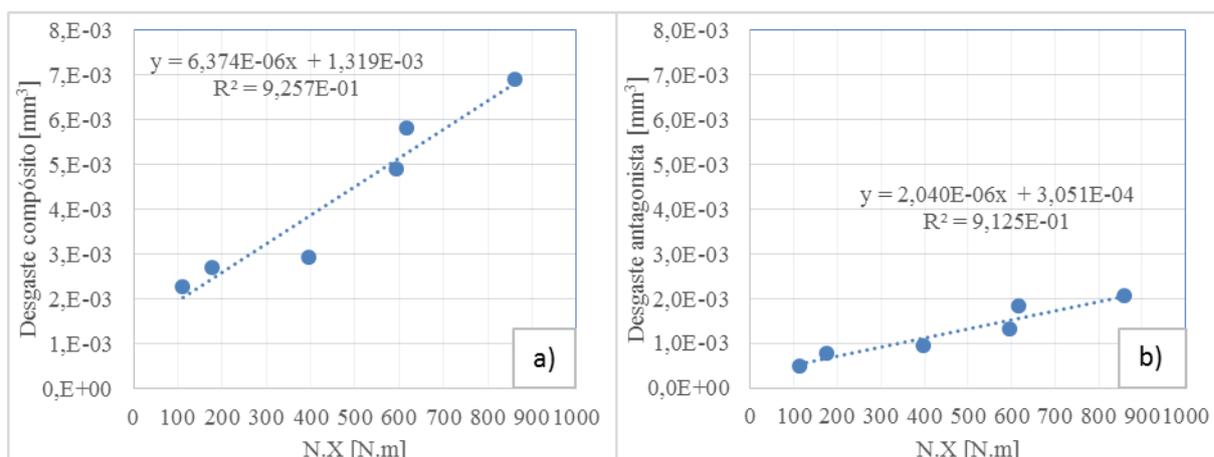


Figura 4.6. Volumes de desgaste de: a) compósito, e, b) antagonista, para uma solução abrasiva de sementes de papoila.

Note-se que, o declive da reta de tendência corresponde ao valor do coeficiente de desgaste do ensaio, k , visto esta ser a relação entre o volume e a severidade. Consequentemente, quanto maior for o valor do coeficiente de desgaste, maior será o declive da reta de tendência. A diferença entre o desgaste do compósito e do antagonista está diretamente relacionado com as durezas dos materiais em teste. Quando a dureza das partículas abrasivas é superior aos materiais, verifica-se uma menor diferença entre o volume de desgaste do compósito e do antagonista. Quanto maior for a dureza das partículas abrasivas, mais próximos serão os desgastes provocados no compósito e no antagonista, como se pode observar pelos ensaios de zeosferas onde os volumes obtidos são bastante mais próximos do que nas sementes de papoila e PMMA.

Verificou-se assim um valor de k , muito superior para a primeira solução abrasiva, tendo uma ordem de grandeza acima do valor obtido para PMMA e três ordens de grandeza acima das sementes de papoila. Por sua vez a solução abrasiva de PMMA apresenta um valor de coeficiente de desgaste duas ordens de grandeza acima das sementes, sendo esta solução a que apresenta então claramente menor valor de k .

Passou-se agora para a análise da força de atrito em função da carga normal aplicada em cada ensaio para as três soluções abrasivas. Para esta análise foram tidos em consideração os valores médios da força de atrito durante o ensaio.

Observando a Figura 4.7, pelo declive da reta de tendência, verifica-se que a variação da força de atrito em função da carga, neste estudo, é tanto maior quanto maior a

constante de desgaste da solução. Assim, a força de atrito para SA-1 apresenta a maior dependência da carga, enquanto a SA-3 apresenta a menor variação da força com a carga. Compreende-se ainda que o declive destas retas, sendo a razão entre a força de atrito e a força normal, representa o coeficiente de atrito, Equação 3.4.

Assim é imediata a comparação entre esses valores para as três soluções, sendo então a SA-1 a que apresenta maior coeficiente de atrito (0,489), seguido pela SA-2 (0,370) e finalmente a SA-3 (0,117). Estes resultados indicam que o atrito é bem representado por modelos lineares quaisquer que sejam as soluções abrasivas e que a deformação plástica é a componente preponderante no atrito, uma vez que o coeficiente de atrito é fortemente dependente da dureza do abrasivo.

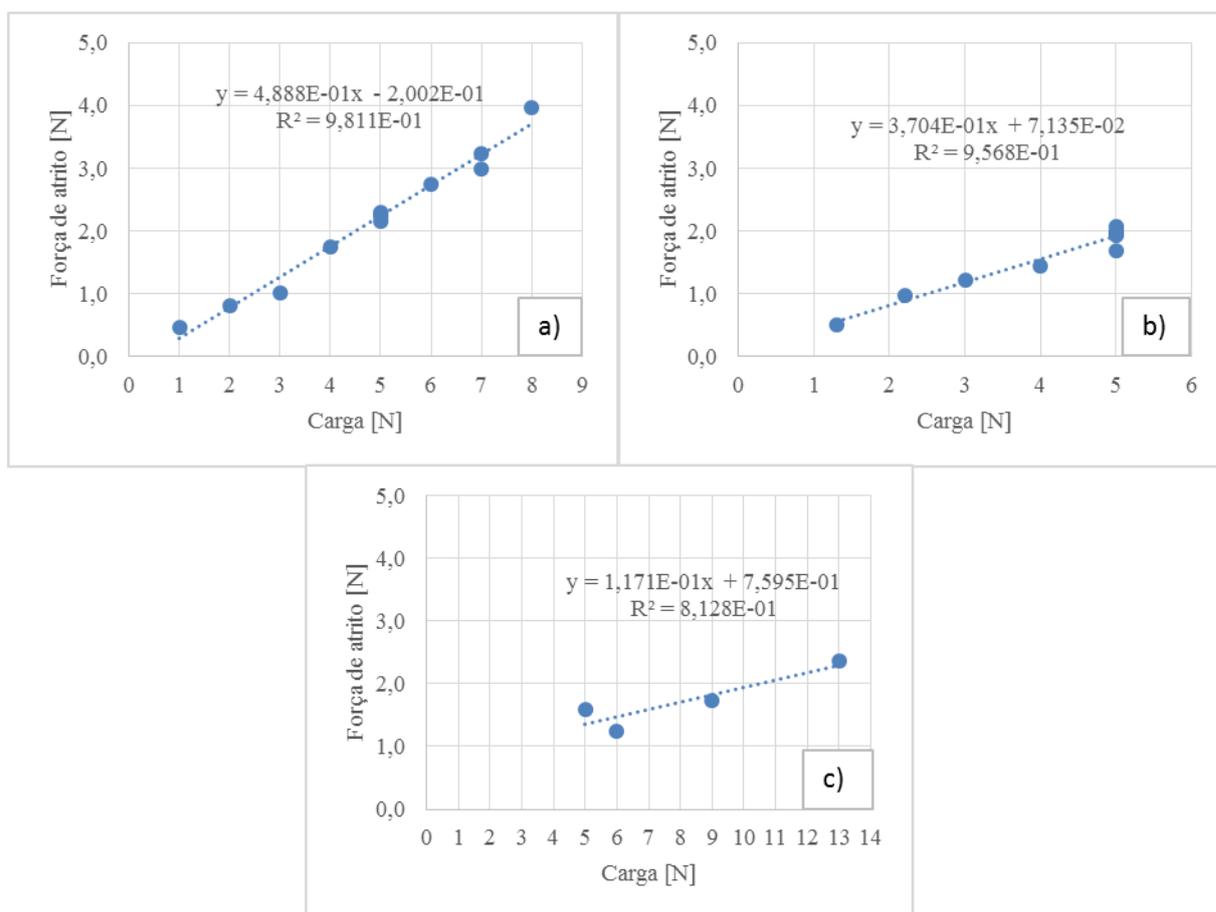


Figura 4.7. Força de atrito em função da carga normal para as soluções abrasivas de: a) zeoesferas, b) PMMA, e, c) sementes de papoila.

Por fim os últimos parâmetros analisados foram a variação do volume de desgaste do compósito e do antagonista em função da energia dissipada por atrito.

Na primeira solução abrasiva, pela análise da Figura 4.8, verificou-se que esta é a que apresenta evolução de desgastes do compósito e respectivo antagonista mais semelhante em função da energia, tendo as retas de tendência declives aproximados. Este resultado era esperado pois as partículas abrasivas, zeosferas, são significativamente mais duras do que o compósito e o vidro usado como antagonista.

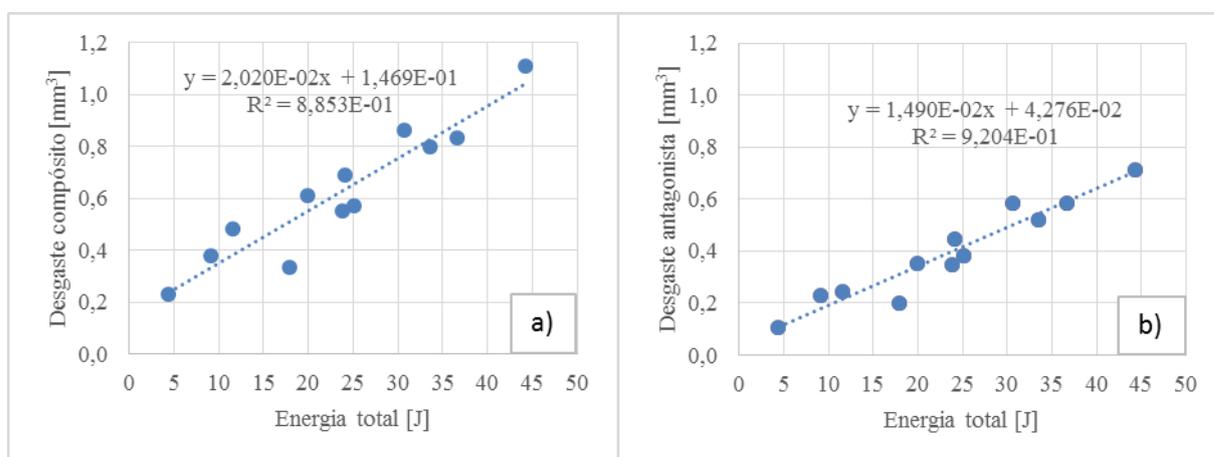


Figura 4.8. Volumes de desgaste do: a) compósito, e, b) antagonista, em função da energia dissipada pela força de atrito, para a solução abrasiva de zeosferas.

Nos ensaios com partículas de acrílico, o declive das retas de tendência do desgaste já é consideravelmente diferente, sendo o valor de declive da reta do compósito, 4,2 vezes superior Figura 4.9.

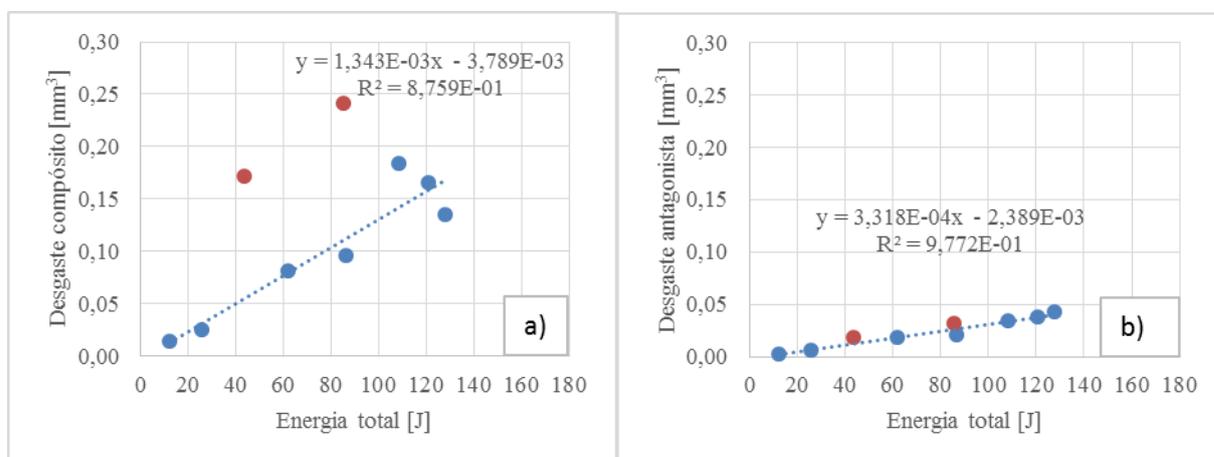


Figura 4.9. Volumes de desgaste do: a) compósito, e, b) antagonista, em função da energia dissipada pela força de atrito, para a solução abrasiva de PMMA.

Nos ensaios realizados, com a SA-3, os resultados da variação dos desgastes com a energia, são semelhantes aos da solução anterior, verificando-se então um maior crescimento do desgaste obtido no compósito do que no antagonista com o aumento da energia Figura 4.10. Neste caso o declive da reta de volume de antagonista removido é 3 vezes inferior.

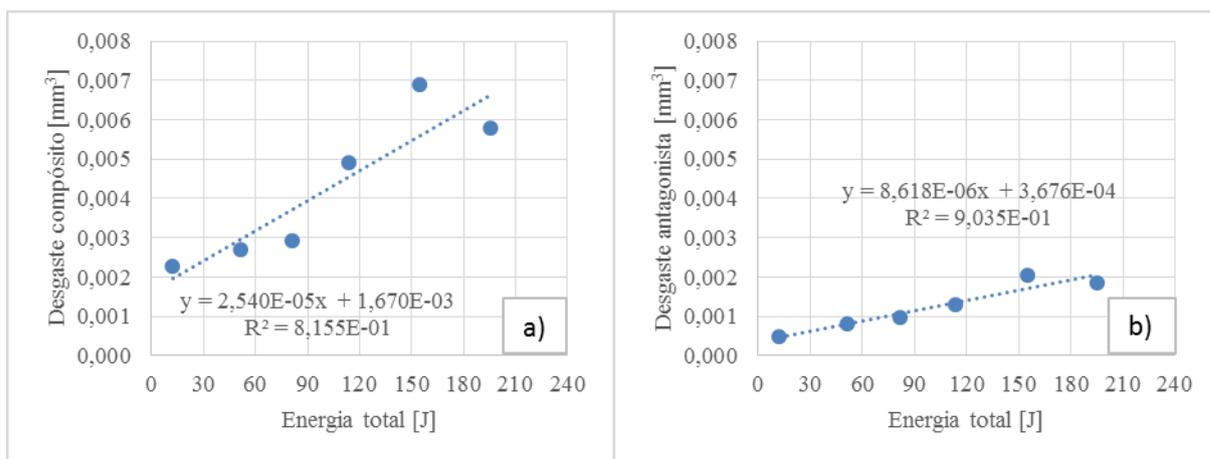


Figura 4.10. Volumes de desgaste do: a) compósito, e, b) antagonista, em função da energia, para a solução abrasiva de sementes de papoila.

Como explanado anteriormente, a abordagem de Archard não tem em conta o coeficiente de atrito no cálculo do valor de volume removido, no entanto, sabendo que pela abordagem energética esse valor é tido em conta, é possível obter um valor desse coeficiente de atrito através da razão entre o declive da reta de tendência da aproximação de Archard e da abordagem energética; Equação 4.1. Os valores calculados para os coeficientes de atrito são expostos na Tabela 4.1.

$$\mu_E = \frac{k}{k'} \quad 4.1$$

Tabela 4.1. Cálculo do coeficiente de atrito para as soluções abrasivas estudadas.

Solução abrasiva	Coeficiente de atrito energético - μ_E	Coeficiente de atrito - μ
Zeosferas	0,469	0,489
PMMA	0,363	0,370
Papoila	0,251	0,117

Foi possível verificar, que os valores obtidos através desta relação para o coeficiente de atrito não são muito diferentes dos estimados pela relação da força de atrito média dos ensaios com a carga, feita anteriormente. Isto deve-se ao facto da maioria dos ensaios realizados serem suficientemente longos para permitirem a estabilização da força de atrito.

Concluiu-se então que as três soluções abrasivas apresentam tendências semelhantes, sendo o aumento do volume de desgaste do compósito superior ao aumento volume de desgaste do antagonista, quando relacionados com a energia dissipada. Este facto deve-se às características dos materiais em causa, nomeadamente à dureza, sendo esta aproximadamente 8,5 vezes superior no antagonista. Esta tendência corresponde à encontrada através da análise de Archard, onde o aumento do volume de material removido no compósito é também mais influenciado pela severidade do que o do antagonista. Como se pode verificar na Tabela 4.2, existem diferenças na ordem de grandeza dos valores de coeficiente de desgaste para ambas as abordagens. Sendo que a solução de zeosferas apresenta agora valor de k' , uma ordem de grandeza acima do das PMMA e três ordens de grandeza acima das sementes.

Tabela 4.2. Valores de k e k' , para cada uma das soluções abrasivas estudadas.

	k [$\text{mm}^3/\text{N.m}$] $\times 10^{-3}$ (DP) [Intervalo de confiança 85%]	k' [mm^3/J] $\times 10^{-3}$ (DP) [Intervalo de confiança 85%]
Zeosferas	9,47 (1,06) [11,19%]	19,3 (2,19) [11,35%]
PMMA	0,488 (0,106) [21,72%]	1,33 (0,225) [16,92%]
Papoila	0,00637 (0,000903) [14,18%]	0,0254 (0,00601) [23,66%]

Finalmente, de forma a poder comparar os valores obtidos de desgaste, com os referidos na bibliografia, foi estimado o valor de altura de desgaste por ciclo e volume por ciclo para cada uma das soluções abrasivas, através do uso coeficiente de desgaste determinado pelos ensaios das soluções abrasivas e apresentados na Tabela 4.2.

Para tal, partiu-se da formulação de Archard-Czichos, Equação 3.1, para estimar o volume médio de desgaste para cada solução, para tal usou-se, k é o coeficiente de desgaste característico de cada solução abrasiva, e N e x , respetivamente os valores médios das cargas aplicadas e das distâncias de todos os ensaios realizados para todas as soluções. A razão entre o volume obtido para cada solução, e o número médio de ciclos realizados corresponde então ao valor médio de volume removido por ciclo apresentado na Tabela 4.3.

Apesar de ser mais indicado avaliar a quantidade de desgaste em volume por ciclo, os valores obtidos na bibliografia referem um valor de altura de desgaste, portanto foi necessário encontrar uma relação entre o volume removido e a altura de desgaste. A Figura 4.11 ilustra os parâmetros tidos em conta para esta relação. Considerou-se que a marca de desgaste obtida pelos ensaios pode ser representada por uma calote cilíndrica, igualou-se o valor do volume determinado pela formulação de Archard-Czichos com a forma do volume da calote cilíndrica, Equação 4.2.

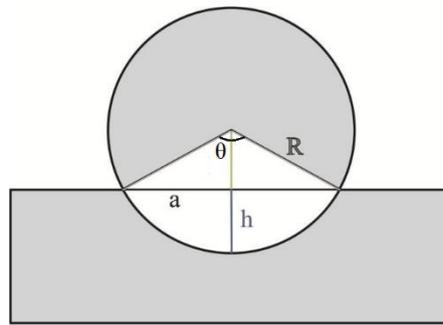


Figura 4.11. Representação do contacto.

$$V = A \times l \quad 4.2$$

Onde o valor da área transversal A pode ser calculado através da Equação 4.3.

$$A = \frac{R^2}{2} (\theta - \sin \theta) \quad 4.3$$

Portanto, o volume da calote cilíndrica pode ser dado pela Equação 4.4.

$$V = \frac{R^2 l}{2} (\theta - \sin \theta) \quad 4.4$$

Uma vez que o valor de θ , é definido em função de h , Equação 4.5, este não pode ser calculado diretamente.

$$\theta = 2 \times \left(\cos^{-1} \left(\frac{R - h}{h} \right) \right) \quad 4.5$$

No entanto, recorrendo novamente à Equação 4.4 mas expressa em função de θ , foi possível calcular o valor desse membro, e com recurso a métodos numéricos chegou-se ao valor de θ .

Sabendo que a altura da calote cilíndrica, pode ser dada pela Equação 4.6, e que o valor de a pode ser calculado com recurso a relações de trigonometria uma vez que o valor de θ já é conhecido, pôde-se calcular o valor da altura de desgaste. A razão entre essa altura de desgaste e o número médio de ciclos efetuados corresponde então à altura de material removido em cada ciclo.

$$h = R - \sqrt{(R)^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \quad 4.6$$

Na Tabela 4.3, é possível observar os valores obtidos de volume e altura de desgaste por ciclo, para cada uma das soluções abrasivas. Foi então possível comparar os valores obtidos, com os valores estimados para o desgaste por ciclo *in vivo*, Tabela 2.1.

Tabela 4.3. Valor de volume e altura de desgaste do compósito por ciclo, para cada solução abrasiva.

	Volume removido [mm³]	V/n [mm³ / ciclo]	h/n [mm / ciclo]
Zeosferas	2,07E+00	2,07E-04	3,71E-05
PMMA	1,08E-01	1,08E-05	5,12E-06
Papoila	1,40E-03	1,40E-07	2,81E-07

Uma vez que os volumes de material removido foram calculados com o valor médio de distancia e carga de todos os ensaios, é possível comparar diretamente as três soluções abrasivas. Verificou-se então que a solução abrasiva que apresentou valores de altura de desgaste por ciclo mais semelhantes aos obtidos *in vivo*, é a solução abrasiva de sementes de papoila, e que as soluções de zeosferas de vidro e PMMA, devido à dureza das suas partículas, induzem a um desgaste muito superior.

Foi ainda feita uma análise microscópica às morfologias das superfícies de alguns ensaios com auxílio de um microscópio eletrónico de varrimento, a fim de verificar mecanismos de desgaste e possíveis variações dos mesmos para diferentes parâmetros de ensaio.

Nas superfícies de desgaste de ensaios utilizando solução abrasiva de zeosferas, foi possível identificar riscos de lavragem profundos bem como partículas de grandes dimensões que foram libertadas e posteriormente ficam presas no contacto, provocando um grande desgaste tanto no compósito como no antagonista. Figura 4.12.

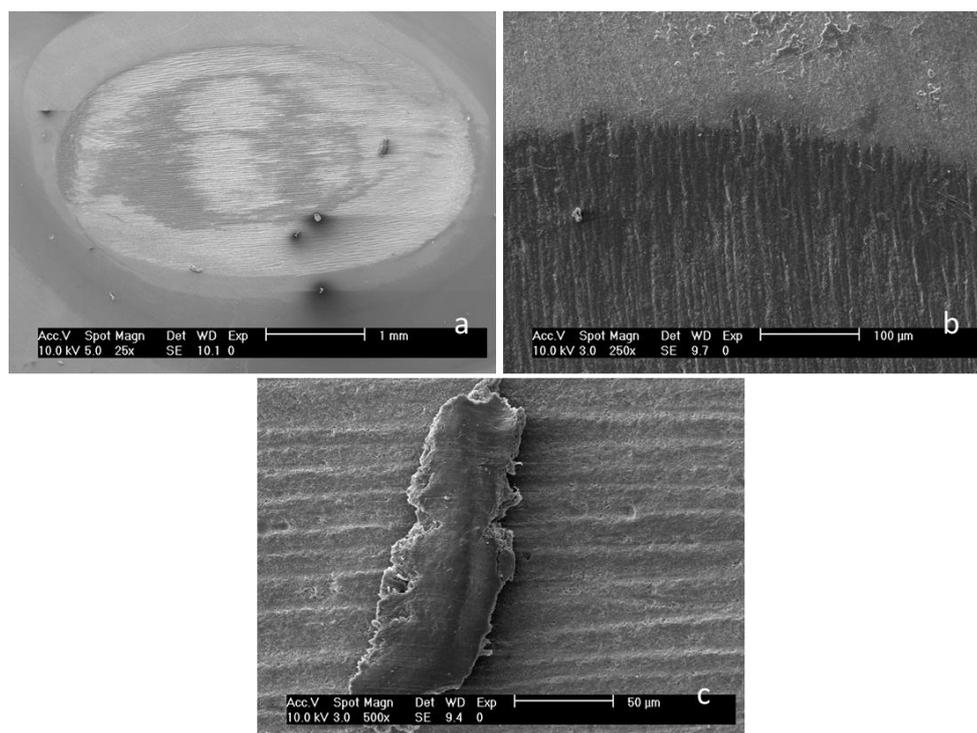


Figura 4.12. Marcas de desgaste de zeosferas num ensaio com 3N e 2600 ciclos: a) marca total de desgaste, b) extremidade da zona contacto, c) partícula de grandes dimensões arrancada.

Nos ensaios de PMMA, como é possível observar na Figura 4.13, as superfícies de desgaste são também caracterizadas por desgaste abrasivo, mas com valores menos pronunciados, os sulcos de desgaste não são tão profundos nem definidos. Nos ensaios realizados com a solução abrasiva de PMMA, para as condições de carga mais elevada ocorria diminuição dos volumes de desgaste. A situação foi confirmada na observação da superfície de desgaste do ensaio de 4 N a 20000 ciclos, conforme se pode observar na Figura 4.13 *b*, onde parece existir ligação das partículas de PMMA à matriz, esta situação verificava-se mais claramente para cargas normais mais elevadas. Na Figura 4.13 *b* e *c* podem observar-se, para a mesma ampliação (4000x) as diferenças das superfícies de desgaste, para os ensaios de cargas normais de 4 N e de 3 N, com duração de 20000 ciclos. Confirma-se a hipótese anteriormente levantada, de que a mistura das PMMA com a matriz, protege a superfície de desgaste e influencia o volume de desgaste.

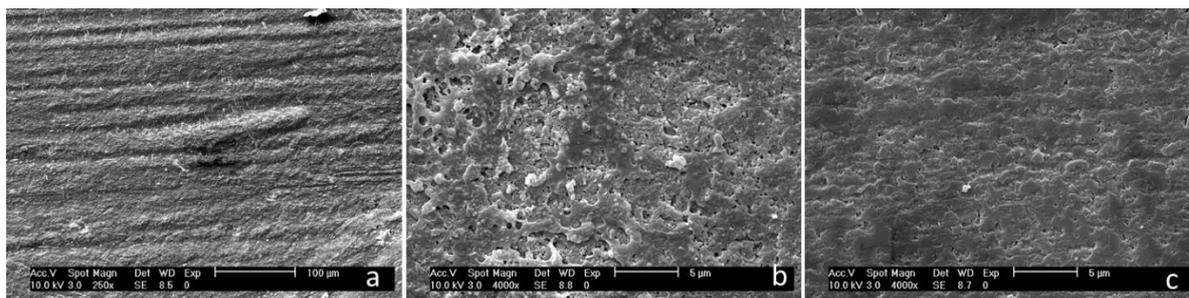


Figura 4.13. Marca de desgaste obtida com PMMA: a) num ensaio com 1,3 N e 20000 ciclos, b) num ensaio de 4 N e 20000 ciclos, c) num ensaio de 3 N e 20000 ciclos

Para este par de materiais, o bordo do contacto acumula maior quantidade de partículas, esta observação é confirmada na Figura 4.14, que demonstra a extremidade da zona de contacto e onde é perceptível a grande acumulação de material, e também pela observação de solução abrasiva que se tornava mais viscosa do que a solução de zeosferas.

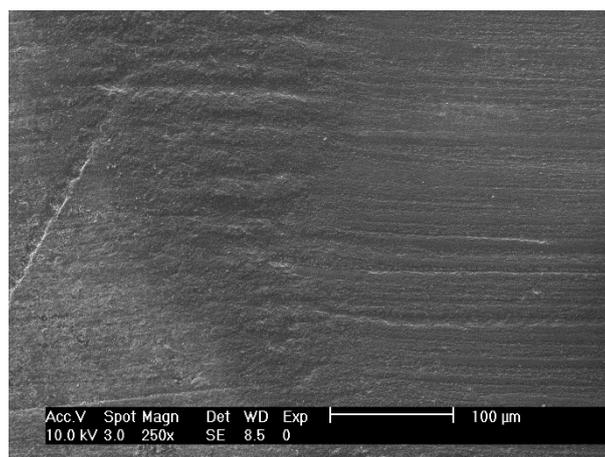


Figura 4.14. Acumulação de material no bordo do contacto num ensaio com PMMA com 3 N e 2000 ciclos.

Em menor grau e com partículas de menores dimensões do que nos ensaios de zeosferas, existem também para o par de materiais, desprendimentos de volumes de compósito. Na Figura 4.15 é perceptível um desses arrancamentos de dimensões muito inferiores ao observado na solução abrasiva de zeosferas.

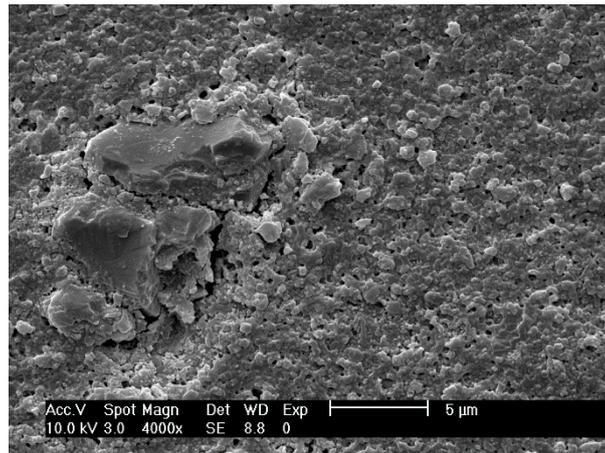


Figura 4.15. Partículas soltas em ensaio de PMMA, com 3 N e 20000 ciclos.

Nos ensaios com esta solução parece haver ligação das partículas de PMMA com o compósito em teste. Parece ainda existir uma mistura de partículas com os detritos de compósito e partículas de reforço como se pode observar na Figura 4.16.

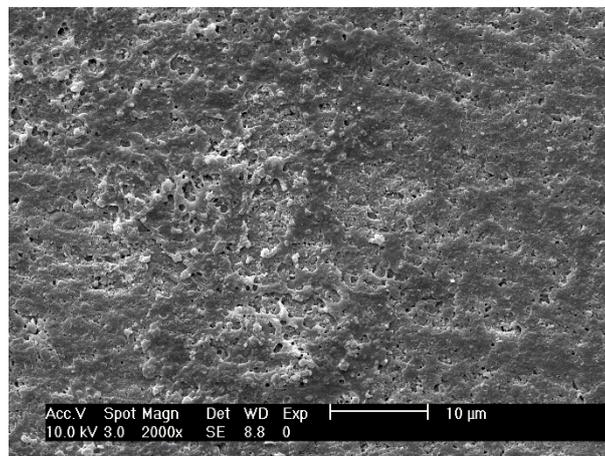


Figura 4.16. Mistura de partículas com detritos de compósito, num ensaio de PMMA com 4 N e 20000 ciclos.

Na Figura 4.17, é possível visualizar a zona de contacto com detritos de menor dimensão e uma boa ligação das partículas de reforço à matriz, não existindo sulcos tão profundos como na solução abrasiva de zeosferas. É ainda possível verificar a presença de partículas ou aglomerados de partículas de PMMA.

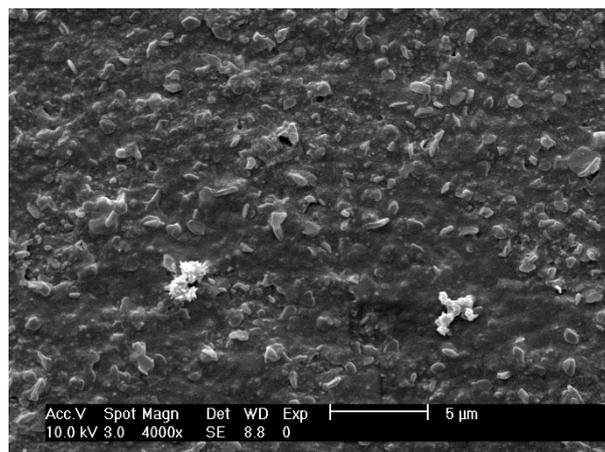


Figura 4.17. Zona de contacto com pequenos detritos, com ligação da matriz com partículas de reforço e aglomerados de partículas de PMMA, num ensaio 3 N e 20000 ciclos.

Destacou-se também nas superfícies de desgaste de ensaios de PMMA, Figura 4.18, uma possível fixação e compactação de pedaços de compósito nas pistas de desgaste, provocando alguma proteção na superfície, como se pode ver pela forma plana que apresenta, e sem riscos protuberantes como acontece nos ensaio com zeosferas, estes aglomerados suportam as cargas e protegem a superfície de contacto.

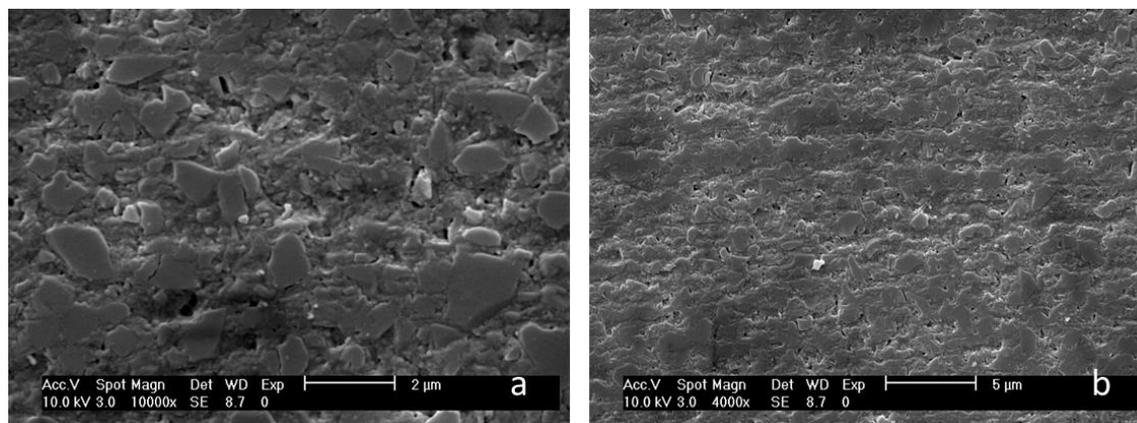


Figura 4.18. Compactação de compósito nas pistas de desgaste num ensaio com PMMA com 3 N e 20000 ciclos.

No entanto esta análise não permitiu identificar claramente uma mudança de mecanismo de desgaste, nos ensaios com PMMA com cargas mais baixas, que justifiquem a dispersão desses pontos quando analisado o volume obtido nessas condições.

Nas marcas produzidas por ensaios com sementes de papoila, são visíveis riscos de abrasão mas sendo estes os mais suaves de todas as soluções ensaiadas, e contrariamente ao que acontece nas outras soluções abrasivas não se identificam partículas soltas ou arrancamentos. Figura 4.19. O mecanismo de desgaste identificado é idêntico ao da solução de PMMA mas com maior suporte de carga por parte da camada criada a partir da destruição da superfície de contacto inicial, note-se que os riscos muito suaves são devidos à menor dureza e abrasividade das partículas da solução abrasiva.

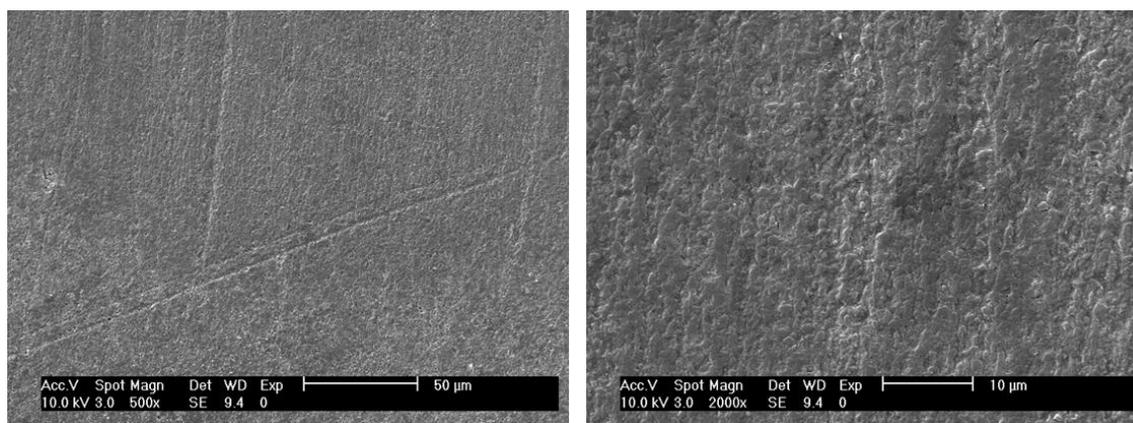


Figura 4.19. Marcas abrasivas provocadas por sementes de papoila num ensaio com 13 N e 15000 ciclos.

Analisando por fim as morfologias e características das marcas de desgaste obtidas nos antagonistas utilizados nos ensaios abrasivos, foi possível identificar algumas diferenças entre as três soluções abrasivas.

Na Figura 4.20 é possível verificar que os antagonistas utilizados em ensaios de zeosferas apresentam uma forma elíptica com sulcos profundos em toda a zona de contacto provocados pelo arrastamento das microesferas de vidro

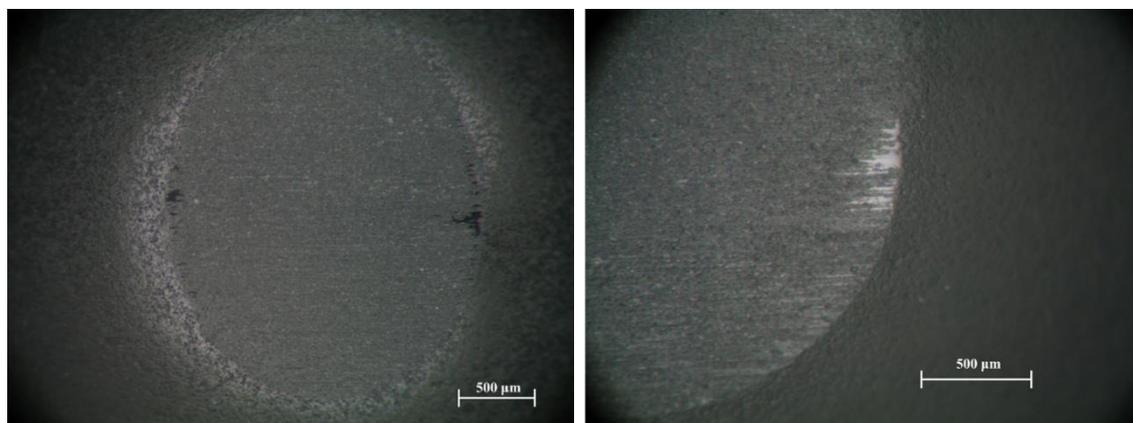


Figura 4.20. Marcas características obtidas em antagonistas em ensaios de zeosferas.

Nos antagonistas usados na solução de PMMA, as superfícies são bastante diferentes das anteriores, não se encontraram riscos tão profundos, a superfície desgastada é lisa, e apresentam uma forma imperfeita, ao contrário do que acontece com as zeosferas, Figura 4.21, estas características devem-se à menor dureza das partículas de acrílico.



Figura 4.21. Marca característica obtida no antagonista num ensaio de PMMA.

Relativamente aos ensaios com sementes de papoila as marcas de desgaste têm dimensões muito mais reduzidas do que as das restantes soluções. Verificaram-se riscos suaves na superfície do antagonista, e surgem com uma forma praticamente circular, Figura 4.22.

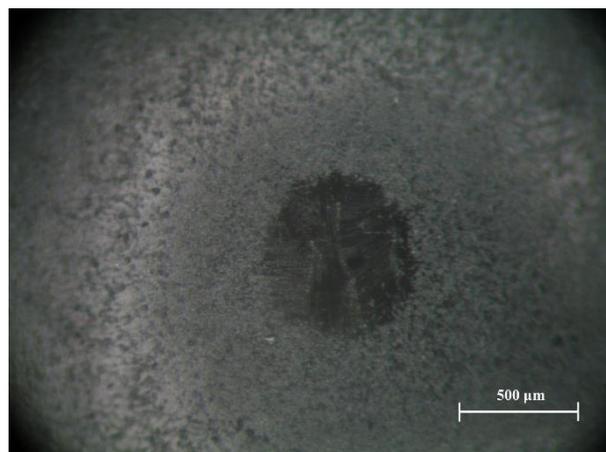


Figura 4.22. Marca característica obtida no antagonista num ensaio de sementes de papoila.

|

5. CONCLUSÕES

A constante procura por melhores alternativas de materiais de restauração dentária, como os compósitos, exige uma constante melhoria da sua caracterização, de modo a permitir também, cada vez mais, melhorar as suas características mecânicas e o seu desempenho.

O objetivo desta dissertação foi estudar a influência de diferentes soluções abrasivas no desgaste em laboratório de materiais de restauração dentária.

Assim a caracterização efetuada no âmbito deste estudo permitiu as seguintes conclusões:

1. Verifica-se que a dureza das partículas abrasivas, influencia diretamente o valor de desgaste obtido no compósito e no antagonista, sendo que para partículas mais duras que os materiais os estes desgastes serão mais próximos, logo é possível concluir que tanto as PMMA como as sementes têm dureza inferior aos materiais.
2. O coeficiente de atrito determinado para o par de materiais é dependente da solução abrasiva, e, os valores de coeficiente de atrito são coerentes com as taxas de desgaste obtidas para as soluções;
3. A diferença entre uma abordagem clássica para cálculo do desgaste e uma abordagem energética pode ser minimizada se aumentada suficientemente a distância total do ensaio. São ambas válidas e fornecem resultados de elevada fiabilidade;
4. A solução abrasiva que provoca efetivamente mais desgaste é a de zeosferas, e, a solução que apresenta menor desgaste, mas também mais próximo do desgaste fisiológico é a de sementes de papoila;
5. A fiabilidade dos resultados obtidos para cada solução é também distinta, a solução abrasiva de zeosferas é a que possui maior fiabilidade, sendo necessário um menor número de ensaios para caraterizar qualquer par de materiais, do lado oposto as sementes de papoila necessitam de um número mais elevado de ensaios e ensaios de maior duração;

6. As partículas de PMMA não podem ser usadas devido ao risco de ligação à matriz, mascarando portanto os resultados de desgaste do compósito;
7. A utilização de cada solução abrasiva pode ser efetuada em função do objetivo do estudo, i.e., se este é comparativo do desempenho de um determinado material ou se pretende simular mais fielmente o que se passa na boca;
8. As três soluções abrasivas produzem marcas de desgaste no compósito e antagonista, distintas entre si;
9. As morfologias das superfícies são coerentes com os valores determinados experimentalmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANTUNES, Pedro Alexandre de Almeida do Vale – “Physical-mechanical characterization of direct restorative dental materials”, Coimbra: [s.n.], 2012. Tese de doutoramento
- [2] S.D. Heintze (2006), “How to qualify and validate wear simulation devices and methods”, *Dental Materials*, 22, 712–734.
- [3] A. Ramalho; P. Vale Antunes – “Mechanical and tribological characterization of dental restorative composite materials”
- [4] P. Lambrechts, M. Braem, M. Vuylsteke-Wauters e G. Vanherle (1989), “Quantitative in vivo Wear of Human Enamel”, *J. Dent. Res.*, 68 (12), 1752-1754
- [5] Josephine F. Esquivel-Upshaw, William F. Rose Jr., Allyson A. Barrett, Erica R. Oliveira, Mark C.K. Yang, Arthur E. Clark, Kenneth J. Anusavice (2012), “Three years in vivo wear: Core-ceramic, veneers, and enamel antagonists” *Dental materials*, 28, 615–621
- [6] N. Krämer, K.-H. Kunzelmann, M. Taschner, A. Mehl, F. Garcia-Godoy and R. Frankenberger (2006), “Antagonist Enamel Wears More Than Ceramic Inlays”, *J. Dent. Res.*, 85 (12), 1097-1100
- [7] Maged K. Etman, DDS, MSc, MMedSc, PhD, Mark Woolford, BDS, FDSRCS, PhD Stephen Dunne, BDS, FDSRCS, PhD (2008), “Quantitative Measurement of Tooth and Ceramic Wear: In Vivo Study”, *Int J Prosthodont*, 21, 245–252
- [8] ISO. Dental Material, Guidance on testing of wear. Part 2. Wear by two-and/or three-body contact. Technical Specification No. 14569-2; 2001.
- [9] Lambrechts, P., Debels, E., Landuyt, K., Peumans, M., Meerbeek, B. (2006), “How to simulate wear? Overview of existing methods”, *Dental Materials*, 22, 693–701.
- [10] Antunes, P., Ramalho, A. (2003), “Study of abrasive resistance of composites for dental restoration by ball-cratering”, *Wear*, 255, 990–998.
- [11] S.D. Heintze, M. Faouzib, V. Roussonb, M. Özcanc (2012), “Correlation of wear in vivo and six laboratory wear methods”, *Dental Materials*, 28, 961-973.
- [12] Amanda Rocha Randazzo, Simone Angélica de Faria Amormino, Mônica de Oliveira Santiago (2006), “Erosão dentária por influência da dieta. Revisão da literatura e relato de caso clínico”, *Arquivo Brasileiro de Odontologia*
- [13] de Gee AJ, Pallav P, Davidson CL (1986) “Effect of abrasion medium on wear of stress bearing composites and amalgam in vitro”, *Journal of Dental Research*; 65(5):654–8.
- [14] Leinfelder KF, Suzuki S. (1999), “In vitro wear device for determining posterior composite wear”, *Journal of the American Dental Association*; 130:1347–53.

https://www.researchgate.net/publication/12806779_In_vitro_wear_device_for_determining_posterior_composite_wear

- [15] Condon J, Ferracane J., (1996), “Evaluation of composite wear with a new multi-mode oral wear simulator”, *Dental Materials*; 12:218–26.
- [16] N. Satou, A.M. Khan, K. Satou, J. Satou, H. Shintani, K. Wakasa and M. Yamaki (1992), “In-vitro and in-vivo wear profile of composite resins” *J. of Oral Rehabilitation*, 19, 31-37.
- [17] Kiyoshi KAKUTA and Hideo OGURA (2008), “Effects of abrasive and fiber components in medium on wear of composite resins”, 27 (5), 716-722.
- [18] Nathaniel C. Lawson, Deniz Cakir, Preston Beck, Mark S. Litaker, John O. Burgess (2012) “Characterization of third-body media particles and their effect on in vitro composite wear”, *Dental Materials*, 28,e118-e126.
- [19] S.D. Heintze, G. Zappini, V. Rousson (2005), “Wear of ten dental restorative materials in five wear simulators—Results of a round robin test”, *Dental Materials*, 21, 304-317.
- [20] S.D. Heintze, W.W. Barkmeier, M.A. Latta, V. Rousson (2011), “Round robin test: Wear of nine dental restorative materials in six different wear simulators – Supplement to the round robin test of 2005”, *Dental Materials*, 27, e1-e9.
- [21] Kunzelmann K-H. (1998), “Verschleissanalyse und -quantifizierung von Füllungsmaterialien in vivo und in vitro.” Shaker Verlag: Aachen.
- [22] A. Ramalho; P. Vale Antunes “Abrasive wear of resin-particle composites: effect of particle size and volume content”
- [23] A. Ramalho, M. D. Braga de Carvalho e P. Vale Antunes, “Effects of temperature on mechanical and tribological properties of dental restorative materials composites”
- [24] Tomotaro Nihei, Alp Dabanoglu, Toshio Teranaka, Shigeaki Kurata, Katsura Ohashi, Yukishige Kondo, Norio Yoshino, Reinhard Hickel, Karl-Heinz Kunzelmann, (2008), “Three-body-wear resistance of the experimental composites containing filler treated with hydrophobic silane coupling agents”, *dental materials* 24, 760–764
- [25] A. Ramalho, P. Vale Antunes, (2005), “Reciprocating wear test of dental composites: effect on the antagonista”, Elsevier, *Wear*, 259, 1005–1011
- [26] Esteves, Miguel Alberto Pereira – “Melhoria da resistência ao desgaste e da eficiência de correntes de transmissão para bicicleta por aplicação de revestimentos PDV” Coimbra 2011, Tese de Mestrado
- [27] 2002. Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. s.l.: ASTM, 2002. Vols. G 133 – 95 (2002).
- [28] H. Czichos, (1978) *Tribology*, “A systems approach to science and technology of friction, lubrication and wear *Tribology Series*”, vol. 1, Elsevier.
- [29] A. Ramalho, J.C. Miranda (2006), “The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems”, *Wear*, 260, 361–367

- [30] A. Ramalho (2010), "A reliability model for friction and wear experimental data", *Wear* 269 213–223
- [31] P.V. Antunes, A. Ramalho, E.V.P. Carrilho (2014), "Mechanical and wear behaviours of nano and microfilled polymeric composite: Effect of filler fraction and size", *Materials and Design*, 61, 50–60.
- [32] A. Ramalho, P. Vale Antunes, (2007), "Reciprocating wear test of dental composites against human teeth and glass", *Wear* 263, 1095–1104

