

CLÁUDIA FIUZA LIMA NAVES DE SOUZA

Influência do Aparelho Fotoativador na Resistência
ao Desgaste de Compósitos Restauradores

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção do título
de Doutor em Engenharia Mecânica na área
de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic

Guaratinguetá
2009

- S731i Souza, Claudia Fiuza Lima Naves de
Influência do aparelho fotoativador na resistência ao
desgaste de compósitos restauradores / Claudia Fiuza Lima
Naves de Souza. - Guaratinguetá : [s.n.], 2009
134 f.: il.
Bibliografia: f. 121-133
Inclui apêndice
- Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2009
Orientador: Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic
Co-orientador: Prof. Dr. Humberto Lopes Rodrigues
1. Desgaste mecânico 2 .Prótese dentária I. Título
- CDU 621.891

DADOS CURRICULARES**CLÁUDIA FIUZA LIMA NAVES DE SOUZA**

Nascimento 20.02.1970 – RIO DE JANEIRO/RJ.

Filiação Firmo Mauro Fiúza Lima
Alba Santos Fiúza Lima

1988/1992 Curso de Graduação
Engenharia Elétrica - Universidade Severino
Sombra - RJ

2001/2003 Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica, nível de Mestrado, Faculdade de
Engenharia do Campus de Bauru da Universidade
Estadual Paulista.

2003/2009 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
nível de Doutorado, Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual
Paulista.

A minha avó Adnéia, com carinho e estima.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser realizado sem a ajuda de diversas pessoas, às quais expresso o meu sincero agradecimento:

Em primeiro lugar agradeço a Deus;
ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio João Crnkovic, pela atenção, incentivo e apoio;
à Dentista Marta Akemi Kato, pelo apoio técnico e sugestões;
à todos os colegas do departamento da UTFPR – Campus de Cornélio Procopio, pelas horas de amizade e companheirismo e em particular ao amigo José Roberto;
às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela presteza e principalmente pela vontade de ajudar;
Às secretárias da pós-graduação Regina e Cristina pela dedicação e amizade.

" O medo de sofrer é pior do que o próprio sofrimento. E nenhum coração jamais sofreu quando foi em busca de seus sonhos."

(Paulo Coelho - O alquimista)

SOUZA, C. F. L. N. **Influência do Aparelho Fotoativador na Resistência ao Desgaste de Compósitos Restauradores**. Guaratinguetá, 2009. 134 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” .

RESUMO

Este trabalho objetivou analisar o comportamento, quanto ao desgaste, de dois compósitos (resinas dentárias), um de fabricação nacional e outro importado ambos existentes no mercado nacional. Entre as várias razões que conduzem à necessidade de substituição destes materiais, em casos de restaurações, encontra-se o desgaste abrasivo, que pode ser causado inclusive pela escovação e pela mastigação. Assim, o estudo deste fenômeno se faz necessário para prever aquele que pode ter um tempo de duração maior dentre os compósitos. Torna-se necessário compreender as propriedades mecânicas, assim como o comportamento clínico desses restauradores estéticos. Os compósitos foram submetidos à fotopolimerização, com três aparelhos fotopolimerizadores, dois contendo lâmpada halógena e o outro LED (diodo emissor de luz). Na fotopolimerização dos compósitos, utilizou-se um mesmo tempo de exposição (20 segundos) e densidade de potências diferentes para os três fotopolimerizadores. O desgaste abrasivo foi realizado em um em uma máquina de microabrasão por esfera rotativa, e as características quanto ao desgaste dos compósitos e à eficácia de cada um dos modelos de aparelhos fotopolimerizadores foram avaliados por ensaios de desgaste abrasivo de três corpos, enquanto que uma análise microscópica da superfície desgastada por microscopia eletrônica de varredura do compósito proporcionou uma avaliação do mecanismo de desgaste atuante. O resultado final desta pesquisa demonstrou que a resistência ao desgaste dos compósitos não foi influenciada pelas características do aparelho fotopolimerizador. O mecanismo de desgaste atuante que preponderou foi o de microabrasão por deslizamento, onde se observou que a

alta quantidade volumétrica de partículas de carga existentes nos compósitos comprometem o desgaste abrasivo.

PALAVRAS-CHAVE: Desgaste, Abrasão, Compósitos, Prótese Dentária.

SOUZA, C.F.L.N. **Influence of the photo polymerizer Apparatus in the Resistance to the Wear of Restoring Composites**. Guaratinguetá, 2009. 134 p. thesis (Mechanical Engineering Doctorate) - Engineering College, Guaratinguetá Campus. Paulista State University “Júlio de Mesquita Filho”.

ABSTRACT

This work aimed to analyze the behavior, related to the wear of two composites (dental resins), of national fabrication and another imported, both existent in the national market. Among several reasons that lead to the necessity of the substitution of these materials, in case of dental restoration, we can find the abrasive wear, which can be caused by brushing and by chewing. This way the study of this phenomenon is necessary to predict that one that can have a higher longevity than the others. It is necessary to understand the mechanical properties, as much as a clinical behavior of these aesthetic restorers. The composites were submitted to photo polymerization with three curing units, two containing a halogen light bulb and another with LED (light emitting diode). In the photo polymerization of the composites, the same time of exposure was used (20 seconds) different energy density potencies for the three photo polymerizers. The abrasive wear was conducted in a ball-cratering device, and the characteristics of wear of the composites and the effectiveness of each of the models were evaluated by essays of the abrasive wear of three bodies, while a microscopic analysis of the worn surface by scanning electronic microscope of the composite provided an evaluation of the active wear mechanism. The final result of this research showed that the resistance to wear of the composites was not influenced by the characteristics of the curing unit. The active mechanism of wear that prevailed was the micro-abrasion by sliding, where it was observed that a high volumetric quantity of particles existent in the composites compromises the abrasive wear of them.

KEYWORDS: Wear, Abrasion, Composites, Dental Prosthesis

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 -	Exemplos de materiais compósitos.....	27
FIGURA 2.2 -	Aparelho Fotopolimerizador, contendo lâmpada halógena.....	31
FIGURA 2.3 -	Aparelho Fotopolimerizador, contendo lâmpada LED.....	33
FIGURA 3.1 -	Exemplos de três processos de desgaste abrasivo.....	39
FIGURA 3.2-	Desgaste de dois e três corpos.....	40
FIGURA 3.3 -	Representação esquemática do microsulcamento.....	41
FIGURA 3.4 -	Representação esquemática do microcorte ou microriscamento.....	42
FIGURA 3.5 -	Representação esquemática do microtrincamento.....	43
FIGURA 3.6 -	Representação esquemática do teste de desgaste abrasivo ASTM G-65.....	47
FIGURA 3.7 -	Representação esquemática do ensaio de desgaste de micro-abrasão por esfera rotativa.....	48
FIGURA 3.8 -	Representação esquemática da seção transversal da cratera de desgaste provocada pelo teste da esfera abrasiva.....	49
FIGURA 3.9 -	Mecanismos de desgaste microabrasivo em função da concentração de SiC e da carga de ensaio para um aço ferramenta temperado e revenido (775 HV). Abrasivo:SiC (4,25 μ m).....	52
FIGURA 3.10 -	Superfície de desgaste de um aço ferramenta temperado e revenido após ensaio de microabrasão. Fração volumétrica de SiC de 0,237 (1,0 g.cm ⁻³) e carga aplicada de 0,25 N.....	52
FIGURA 3.11 -	Superfície de desgaste de um aço ferramenta temperado e revenido (775HV) após ensaio de microabrasão. Fração volumétrica de diamante na lama abrasiva de 0,0009 (0,003g cm ⁻³) e carga de ensaio de 0,25 N.....	53
FIGURA 3.12 -	Relação esquemática entre a taxa de desgaste e a razão H_A/H_S	56
FIGURA 3.13 -	Micrografia eletrônica de varredura mostrando o aspecto das regiões fraturadas nos ensaios de tração para o material sem reforço e para o material compósito com diferentes frações volumétricas de SiC. (a) Al/SiC 5 %, (b) Al/SiC 10 %, (c) Al/SiC 15%, (d) Al/SiC 0 %.....	58

FIGURA 3.14 -	Micrografia eletrônica de varredura mostrando o aspecto das regiões fraturadas nos ensaios de tração para o material sem reforço e para o material compósito com diferentes frações volumétricas de SiC. (c) Al/SiC 15%, (d) Al/SiC 0 %.....	59
FIGURA 3.15 -	Micrografias ópticas mostrando o aspecto microestrutural do material sem reforço e do material com diferentes frações volumétricas de SiC (sem ataque).....	61
FIGURA 3.16 -	Desgaste de Compósitos. (a) O tamanho das partículas é bem menor que a deformação causada pela superfície oposta. (b) As partículas são grandes e compatíveis com a deformação causada superfície oposta.....	63
FIGURA 4.1 -	Representação esquemática da matriz de alumínio, com as respectivas medidas.....	68
FIGURA 4.2 -	Sanduiche formado por vidro, matriz de alumínio, vidro.....	69
FIGURA 4.3 -	Espectrofotômetro (FTIR – BOMEM).....	70
FIGURA 4.4 -	Resina composta, clorofórmio, pastilhas de NaCl.....	71
FIGURA 4.5 -	Mistura do pó da resina fotopolimerizada, com KBr.....	72
FIGURA 4.6 -	Pesagem do pó da resina fotopolimerizada, em balança analítica.....	72
FIGURA 4.7 -	Colocação da Mistura em molde especial.....	72
FIGURA 4.8 -	Colocação do molde especial na prensa.....	73
FIGURA 4.9 -	Obtenção da pastilha ou disco.....	73
FIGURA 4.10 -	Colocação da pastilha ou disco no espectrômetro.....	73
FIGURA 4.11 -	Máquina de microabrasão por esfera rotativa.....	77
FIGURA 4.12 -	Cratera formada no ensaio de microabrasão. Imagem obtida através do aumento de 80x, no microscópio óptico.....	79
FIGURA 4.13 -	Obtenção do diâmetro da esfera.....	79
FIGURA 4.14 -	Superfície formada após o ensaio de micro abrasão, mostrando a superfície desgastada e a calota obtida no software ImajeJ,	80
FIGURA 5.1 -	Espectro de infravermelho do compósito I sem a fotopolimerização.....	83
FIGURA 5.2 -	Espectro de infravermelho do compósito I fotopolimerizado com o aparelho AH (lâmpada halógena e 452 mW/cm ²).....	84
FIGURA 5.3 -	Espectro de infravermelho do compósito I fotopolimerizado com o aparelho BH (lâmpada halógena e 700 mW/cm ²).....	84

FIGURA 5.4 -	Espectro de infravermelho do compósito I fotopolimerizado com o aparelho CL (LED e 680 mW/cm^2).....	85
FIGURA 5.5 -	Espectro de infravermelho do compósito II sem ser fotopolimerizado.....	86
FIGURA 5.6 -	Espectro de infravermelho do compósito II fotopolimerizado com o aparelho AH (lâmpada halógena e 452 mW/cm^2)....	87
FIGURA 5.7 -	Espectro de infravermelho do compósito II fotopolimerizado com o aparelho BH (lâmpada halógena e 700 mW/cm^2)....	87
FIGURA 5.8 -	Espectro de infravermelho do compósito II fotopolimerizado com o aparelho CL (LED e 680 mW/cm^2)....	88
FIGURA 5.9 -	MEV/EDS do compósito I, fotopolimerizada com o aparelho BH (lâmpada halógena, 700 mW/cm^2).....	90
FIGURA 5.10 -	MEV/EDS do compósito II, fotopolimerizado com o aparelho BH (lâmpada halógena, 700 mW/cm^2).....	91
FIGURA 5.11 -	Grau de conversão do compósito I, fotopolimerizado com as diferentes densidades de potência dos aparelhos AH, BH e CL.....	92
FIGURA 5.12 -	Grau de conversão do compósito II, fotopolimerizada com as diferentes densidades de potência dos aparelhos AH, BH e CL.....	93
FIGURA 5.13 -	Grau de conversão dos compósitos I e II, fotopolimerizadas com as diferentes densidades de potência dos aparelhos AH, BH e CL.....	94
FIGURA 5.14 -	Gráfico de porosidade aparente do compósito I em relação às densidades de potência dos três aparelhos fotopolimerizadores.....	96
FIGURA 5.15 -	Porosidade aparente, do compósito II em relação as densidades de potência dos três aparelhos fotopolimerizadores.....	97
FIGURA 5.16 -	Comparação dos valores da porosidade dos compósitos I e II em relação a cada a densidade de potência de cada aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.....	98
FIGURA 5.17 -	Microdureza Vickers – compósito I fotopolimerizado com as diferentes densidades de potência dos aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.....	100
FIGURA 5.18 -	Microdureza Vickers – compósito II fotopolimerizado com as diferentes densidades de potência dos aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.....	101
FIGURA 5.19 -	Comparação dos valores de microdureza Vickers dos compósitos I e II, em relação a cada densidade de potência de cada aparelho AH, BH e CL.....	102

FIGURA 5.20 -	Coeficiente de desgaste do compósito I, fotopolimerizada com as diferentes densidades de potência dos aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.....	104
FIGURA 5.21 -	Coeficiente de desgaste do compósito II, fotopolimerizada com as diferentes densidades de potência dos aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.....	106
FIGURA 5.22 -	Gráfico comparativo do comportamento de cada aparelho no resultado do coeficiente de desgaste entre os compósitos I e II.....	107
FIGURA 5.23 -	Fotomicrografia do compósito I e II fotopolimerizado, antes do teste de microabrasão.....	108
FIGURA 5.24 -	Calota formada pela entrada de abrasivo entre esfera e corpo de prova.....	108
FIGURA 5.25 -	(a) Fotomicrografia da superfície desgastada do compósito II, (b) Fotomicrografia da superfície desgastada do compósito I, fotoativados com o aparelho fotopolimerizador AH com ampliação de 400x.....	109
FIGURA 5.26 -	(a) EDS do compósito II, (b) EDS do compósito I, realizado dentro da cratera formada no ensaio microabrasão, referente à Figura 5.24, fotopolimerizada com o aparelho AH.....	109
FIGURA 5.27 -	Fotomicrografia da superfície Desgastada do compósito II (a) e do compósito I (b), fotoativados com o aparelho BH.....	110
FIGURA 5.28 -	EDS dos compósitos II (a) e I (b), realizado dentro da cratera formada no ensaio microabrasão, referente à Figura 5.27, fotopolimerizada com o aparelho BH.....	111
FIGURA 5.29 -	Fotomicrografia do compósito I e II, desgastado com ampliação de 4.00KX, e detalhe do desgaste	112
FIGURA 5.30 -	vista frontal (a) e vista superior (b) do início do arrancamento das partículas de desgaste por microabrasão.....	117
FIGURA 5.31 -	Estágios de como ocorre o mecanismo de desgaste de microabrasão por deslizamento.....	117

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 -	Cor , propriedade física e composição dos compósitos....	66
TABELA 4.2 -	Composição química e dureza do aço ASTM 52100.....	66
TABELA 4.3 -	Aparelhos Fotopolimerizadores.....	67
TABELA 5.1 -	Constituintes inorgânicos dos compósitos (% em peso)..	90
TABELA 5.2 -	Grau de conversão dos compósitos I e II.....	92
TABELA 5.3 -	Valores de porosidade aparente para o compósito I.....	95
TABELA 5.4 -	Valores de porosidade aparente para o compósito II.....	95
TABELA 5.5 -	Valores médios de porosidade e análise estatística para o compósito I e compósito II em função da densidade de potência dos aparelhos fotopolimerizadores.....	96
TABELA 5.6 -	Média e variância da microdureza dos compósitos I e II com os aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL e análise estatística, referentes à microdureza Vickers.....	100
TABELA 5.7 -	Média, desvio padrão e análise estatística do coeficiente de desgaste dos compósitos I e II fotoativados com diferentes densidades de potência dos aparelhos AH, BH e CL.....	104
TABELA 5.8 -	Valores de porosidade, dureza, coeficiente de desgaste e grau de conversão dos compósitos I e II.....	113
TABELA 5.9 -	Valores de percentual de carga inorgânica e tamanho das partículas de enchimento dos compósitos I e II.....	113
TABELA 5.10 -	Síntese da análise dos mecanismos de desgaste atuantes, para o compósito I.....	115
TABELA 5.11 -	Síntese da análise dos mecanismos de desgaste atuantes, para compósito II.....	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

> - maior

BALL CRATERING – Dispositivo mecânico que provoca um desgaste em forma de calota esférica.

LED – (light emitting diodes) Diodo emissor de luz

MEV - microscópio eletrônico de varredura

EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia

ASTM – American Society for Testing and Materials

FTIR - Espectroscopia infravermelho com transformações de Fourier

UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

J/cm² - Joules por centímetro quadrado (quantidade de energia por área)

Kg - quilograma

m - metro

mm - milímetro

nm - nanômetro

mW - Miliwatts

mW/cm² - Miliwatts por centímetro quadrado

°C - graus Celsius

r.p.m - rotação por minuto

s – segundos

N – Newton

m³ - metro cúbico

Bis-GMA - Bisfenol glicídico metacrilato

TEGDMA - Trietilenoglicol dimetacrilato

UDMA - Uretano dimetil dimetacrilato

VOLT - Unidade de tensão elétrica

W - Unidade de potência elétrica (Watt)

µm - micrômetro

Psi – (pound force per square inch) , libra por polegada quadrada, é a unidade de pressão no sistema Inglaterra/americano.

NaCl – Cloreto de Sódio

KBr – Brometo de potássio

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABELAS.....	16
Resumo.....	9
Abstract.....	11
CAPÍTULO 1 Relevância e Motivação da Pesquisa.....	21
1.1 Objetivo.....	23
1.2 Organização do trabalho.....	23
CAPÍTULO 2. Revisão Bibliografica	25
2.1 Introdução.....	25
2.2 Materiais Poliméricos	25
2.3 Materiais Compostos	26
2.4 Compósitos Restauradores.....	28
2.5 Método de Polimerização.....	30
2.6 Fontes de Fotopolimerização.....	30
2.6.1 Lâmpada halógena	31
2.6.2 LED.....	32
2.7 Fatores que influenciam na dureza dos compósitos restauradores.....	33
2.8 Fatores que influenciam as propriedades dos compósitos restauradores.....	35
2.9 Tempo de exposição	35
2.10 Grau de Conversão das Resinas.....	35
CAPÍTULO 3. Desgaste de Materiais.....	37
3.1 Introdução.....	37
3.1.1 Desgaste Abrasivo.....	38
3.1.2 Tipos de Desgaste Abrasivo.....	40
3.1.3 Mecanismo do Desgaste Abrasivo.....	41
3.2 Fatores que influenciam o Desgaste Abrasivo.....	43
3.2.1. O Tamanho do Grão.....	44
3.2.2 A Carga Aplicada.....	45
3.2.3 Dureza dos materiais utilizados.....	46
3.3 Equipamentos Usados na Simulação do Desgaste	46
3.4 Desgaste Abrasivo em aço, Mecanismos e Fatores que Influenciam.....	51
3.5 Variação da taxa de desgaste ou coeficiente de desgaste x regime de desgaste.....	54
3.6 Desgaste Abrasivo em Polímeros e Compósitos, Mecanismos e Fatores que Influenciam.....	56
3.6.1 Desgaste Abrasivo em Compósitos Restauradores.....	61
3.6.2 Mecanismo de Desgaste em compósitos.....	62
3.6.3 Desgaste Abrasivo X Tamanho das Partículas de Enchimento dos Compósitos	64
CAPÍTULO 4. Materiais e Métodos.....	66
4.1 Compósitos.....	66

4.2 Esfera de Aço.....	66
4.3 Partícula abrasiva.....	67
4.4 Aparelhos Fotopolimerizadores.....	67
4.5 Procedimento Experimental.....	67
4.6 Ensaios Realizados.....	69
4.7 Análise Estatística dos Resultados Experimentais.....	80
4.8 Análise dos Mecanismos de Desgaste.....	80
CAPÍTULO 5. Resultados e Discussões.....	82
5.1 Introdução.....	82
5.1.1 Características químicas dos compósitos.....	82
5.1.2 Análise da parte orgânica dos compósitos.....	82
5.1.3 Análise da parte inorgânica dos compósitos.....	89
5.2 Resultados do grau de conversão dos compósitos.....	91
5.3 Resultados de medida de porosidade.....	95
5.4 Resultados de medidas de microdureza	99
5.5 Resultados de medidas de Desgaste.....	103
5.6 Análise da Superfície Desgastada.....	107
5.7 Análise da influência das características dos materiais, do grau de conversão, da porosidade e da dureza sobre a taxa de desgaste.....	113
5.8 Síntese da análise do mecanismo de desgaste atuante nos compósitos quando fotopolimerizados com os aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.....	115
CAPÍTULO 6. Conclusões.....	119
REFERÊNCIAS.....	121
APÊNDICE A.....	134

CAPÍTULO 1 RELEVÂNCIA E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

O desenvolvimento de sistemas adesivos e resinas compostas fotoativadas estabeleceu uma nova etapa na área da dentística restauradora, com materiais capazes de reparar algumas imperfeições naturais ou acidentais. Sendo assim, as resinas compostas foram criadas com o objetivo de reparar as perdas de tecido dentário dos seres humanos.

Dentre os vários materiais existentes que poderiam ser utilizados para este fim, as resinas compostas foram escolhidas por serem extensivamente utilizadas, apresentarem razoável resistência ao desgaste, serem de fácil manuseio e possuírem uma grande gama de cores, o que possibilita alcançar um alto nível de semelhança com os dentes humanos, tornando-se praticamente imperceptíveis, após sua aplicação.

O ideal seria que esses materiais restauradores odontológicos se desgastassem de modo semelhante ao do esmalte dentário, o que frequentemente não parece ocorrer. Entre as várias razões que conduzem à necessidade de substituição destes materiais, em casos de restaurações, encontra-se o desgaste abrasivo, que pode ser causado inclusive pela escovação e pela mastigação. Assim, o estudo deste fenômeno se faz necessário para prever aquele que pode ter um tempo de duração maior dentre as resinas compostas (BIANCHI, 2003).

Os materiais atuais são complexos e tecnicamente sofisticados. Dessa forma, para evitar que a seleção seja efetuada somente de acordo com a preferência do dentista, torna-se necessário compreender as propriedades físicas, mecânicas e biológicas, assim como o comportamento clínico desses compósitos restauradores. A morfologia e o tamanho das partículas têm grande influência nas diversas propriedades do material, como lisura de superfície, viscosidade, resistência à fratura, desgaste, dureza, contração e profundidade de polimerização (BIANCHI, 2003).

As resinas compostas fotopolimerizáveis pelo sistema de luz visível tiveram uma rápida evolução desde sua introdução, em 1980, e hoje dominam o mercado mundial, provando sua eficiência e popularidade.

Dentre algumas vantagens das resinas fotopolimerizáveis está a dureza, relacionada diretamente com o grau de polimerização dos compósitos. Uma polimerização incompleta pode ser ocasionada por uma baixa intensidade de luz, tempo de exposição diminuída e incorreta execução da técnica de polimerização, podendo ser influenciada pela composição do material, pelo tipo de aparelho utilizado e pelo estado de conservação. Isso ocasiona um grande efeito sobre as propriedades finais e a durabilidade das restaurações, a cor do material, a penetração insuficiente de luz e distância entre a fonte de luz e a resina.

O avanço na indicação dos materiais fotoativados resultou numa maior demanda e em uso mais freqüente de aparelhos fotopolimerizadores. Vários são os tipos de aparelhos existentes no mercado, que devem ser providos de características como comprimento de onda e intensidade adequada para polimerização das resinas compostas, e de um regulador de voltagem, pois alterações na voltagem podem alterar a intensidade emitida pelos aparelhos.

Problemas encontrados nesses aparelhos podem levar a uma polimerização inadequada das resinas compostas, ocasionando uma insuficiente retenção da resina no esmalte, maiores riscos de agressão pulpar através da microinfiltração marginal, mudança na cor do material e diminuição nas propriedades mecânicas. As diversas causas de perda de rendimento clinicamente relevantes enfatizam a necessidade de revisões periódicas dos aparelhos fotopolimerizadores.

A intensidade de luz emitida por esses aparelhos fotopolimerizadores tem sido considerada um fator primordial na determinação do desempenho. Objetivando a resolução desses problemas, há no mercado um aparelho portátil, denominado radiômetro, que é utilizado para verificar os valores de intensidade de luz dos aparelhos, tendo a finalidade de auxiliar o profissional na escolha e na manutenção dos seus aparelhos geradores de luz.

Entretanto, a preocupação dos fabricantes com a falta de padronização das unidades fotopolimerizadoras provocou um grande desenvolvimento de aparelhos que, em recente lançamento, apresentam uma variedade de características adicionais. Atualmente, são encontrados no mercado aparelhos com capacidade de emitir altas intensidades de luz e também intensidades baixas, e as quais vão aumentando gradativamente, promovendo uma polimerização gradual dos compósitos.

1.1 OBJETIVOS

A carência de informações a respeito dos novos aparelhos fotopolimerizadores do tipo com lâmpada halógena e LED, levou a avaliar, por meio de teste de desgaste abrasivo de três corpos, duas resinas utilizadas no mercado nacional. Uma análise microscópica da superfície desgastada por microscopia eletrônica de varredura foi realizada como o objetivo de qualificar a perda de material das resinas analisadas, e avaliar a capacidade de polimerização dos aparelhos fotopolimerizadores utilizados.

Para se atingir os objetivos, serão desenvolvidas as seguintes metas:

- (a) realizar ensaios de desgaste em um dispositivo de teste de desgaste abrasivo;
- (b) referenciar o grau de conversão das amostras;
- (c) referenciar a porosidade das amostras;
- (d) referenciar a dureza das amostras após fotopolimerização;
- (e) analisar o mecanismo de desgaste operante por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos, distribuídos da seguinte maneira:

CAPÍTULO 1 RELEVÂNCIA E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Neste capítulo será abordada a relevância e motivação da pesquisa.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados a história da compósitos restauradores e suas características, Aparelhos Fotopolimerizadores.

CAPÍTULO 3 DESGASTE DE MATERIAIS

Neste capítulo a resistência ao desgaste, suas características gerais e tipos de desgaste serão apresentados.

CAPÍTULO 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e a metodologia desenvolvida na análise dos compósitos.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão tratados os resultados e as análises obtidas dos ensaios com os compósitos utilizados.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES DO TRABALHO

Dele constarão as conclusões gerais.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Segundo Hahn (1994) as sociedades avançadas em todo o mundo rapidamente adquirem habilidades sem precedentes no sentido de criar materiais projetados para satisfazer necessidades humanas. Em todo país, a qualidade de vida e segurança econômica e militar dependem cada vez mais da capacidade de sintetizar e processar materiais, de descobrirem novos e de integrá-los em tecnologias de manufatura economicamente eficientes e ecologicamente seguras. Na verdade, sem os novos materiais e sua produção eficiente, não existiria o nosso mundo de equipamentos modernos, máquinas, computadores, automóveis, aeronaves, aparelhos de comunicação e produtos estruturais.

2.2 MATERIAIS POLIMÉRICOS

Segundo Anusavise (1998) um polímero é uma substância que, embora tenha estabilidade dimensional no uso normal, apresenta comportamento plástico em algum estágio da fabricação.

Uma das principais e mais importantes características dos polímeros são as mecânicas. Segundo ela os polímeros podem ser divididos em termoplásticos, termoendurecíveis (termofixos) e elastômeros (borrachas). Os termoplásticos: São também chamados plásticos, e são os mais encontrados no mercado. Pode ser fundido diversas vezes, alguns podem até dissolver-se em vários solventes. Logo, sua reciclagem é possível, característica bastante desejável atualmente. Eles podem ser subdivididos em: PC - Policarbonato, PU - Poliuretano, PVC - Poli Cloreto de Vinila, PS - Poliestireno, PP - Polipropileno. Os termorrígidos: São rígidos e frágeis, sendo muito estáveis a variações de temperatura. Uma vez prontos, não mais se fundem. O aquecimento do polímero acabado promove decomposição do material antes de sua fusão, tornando sua reciclagem complicada. São exemplos deste material:

- Baquelite: usada em tomadas e no embutimento de amostras metalográficas;
- Poliéster: usado em carrocerias, caixas d'água, piscinas, na forma de plástico reforçado (fiberglass).
- elastômeros: Classe intermediária entre os termoplásticos e os termorrígidos: não são fusíveis, mas apresentam alta elasticidade, não sendo rígidos como os termofixos. Reciclagem complicada pela incapacidade de fusão. São aplicados em pneus, vedações, mangueiras de borracha (PADILHA,1997).

Segundo Mano, Mendes (2004) as propriedades físicas dos polímeros estão relacionadas à resistência das ligações covalentes, à rigidez dos segmentos na cadeia polimérica e à resistência as forças intermoleculares entre as moléculas do polímero. Assim, pode-se compreender por que motivo a Ciência e a Tecnologia dos polímeros são tão fortemente interligadas.

2.3 MATERIAIS COMPOSTOS

A definição de material compósito segundo Schwartz (1983) é um “sistema de materiais composto de uma mistura ou combinação de dois ou mais macroconstituintes que se diferem na forma e/ou composição e são essencialmente insolúveis entre si”.

Mas Segundo Chawla (1998), compósitos são materiais multifásicos constituídos por duas ou mais fases física e quimicamente distintas, adequadamente arranjadas, apresentando uma interface de separação entre as fases.

Para Callister (2000) os materiais compostos, são formados por duas fases uma das fases normalmente mais dúctil se apresenta em maior proporção sendo comumente denominada “matriz”. A outra se apresenta em menor proporção, sendo mais dura do que a matriz e é normalmente denominada “reforço”. Estes materiais, de modo geral são classificados de acordo com o tipo de reforço e orientação dos mesmos (figura 2.1).

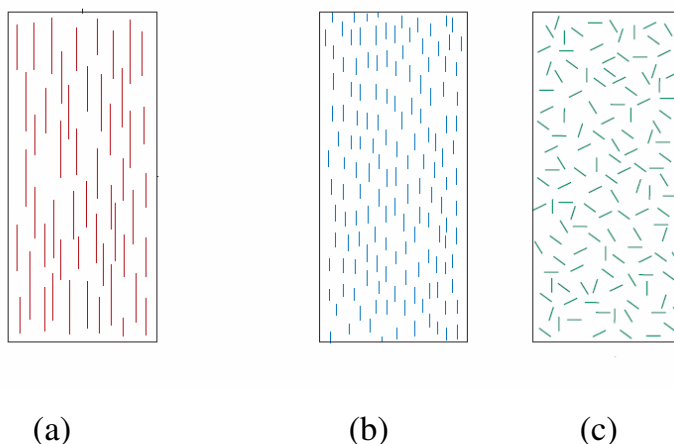


Figura 2.1 – Esquema de representação de materiais compósitos: (a) fibras contínuas, unidirecional; (c) fibras descontínuas, randômicas; (adaptação) (CALLISTER,2000).

Dos materiais compósitos pode-se obter combinações que podem ser de materiais de mesma classe como, por exemplo, duas cerâmicas ou dois metais, ou materiais de classes diferentes como um vidro e um polímero (KELLY,1988). Hoje na indústria, vários elementos já são fabricados com materiais compósitos devido as suas características mistas que unem propriedades de metais, cerâmicas e polímeros (KOMEYA e MATSUI,1994). Uma importante característica dos materiais compósitos é a possibilidade de se obter uma propriedade específica como eletromagnetismo, expansão térmica, alta rigidez e resistência específica de modo tal que seria impossível de se obter utilizando um dos componentes individualmente (KELLY,1988).

Segundo Fonseca (2006) uma forma conveniente de se classificar os diferentes tipos de materiais compósitos esta ligada ao tipo de material da matriz. Dessa forma podem ser classificados como compósitos de matriz polimérica (PMCs), compósitos de matriz metálica (MMCs) e compósitos de matriz cerâmica (CMCs). O reforço, que pode ser constituído de um polímero, metal ou cerâmica, pode estar na forma de fibras contínuas ou curtas, whiskers, partículas e plaquetas.

2.4 COMPÓSITOS RESTAURADORES

Segundo Mano, Mendes (2004) O termo resina foi inicialmente aplicado a exsudações de plantas, que se apresentam sob a forma de gotas sólidas ou como líquidos muito viscosos, de cor amarelada, transparentes, encontradas no tronco das árvores como o pinheiro, a mangueira. São materiais solúveis e fusíveis, de peso molecular intermediário a alto, que amolecem gradualmente por aquecimento e são insolúveis em água, porém solúveis em alguns solventes orgânicos. Por assimilação, esse termo é também empregado para designar os polímeros sintéticos que, quando aquecidos, amolecem e apresentam o mesmo tipo de comportamento, podendo citar o polietileno, o poliestireno e outros polímeros podem ser incluídos entre as resinas sintéticas.

Para Leinfelder (1988) as resinas compostas são amplamente utilizadas e pesquisadas, oferecendo ao clínico uma oportunidade já mais vista de tratar os pacientes, devido sua grande variedade de cor, permitindo a reprodução satisfatória das características ópticas do esmalte e da dentina.

Os compósitos podem ser classificados quanto ao tamanho e forma de suas partículas de carga. A morfologia e tamanho das partículas têm grande influência nas diversas propriedades do material, como lisura superficial, viscosidade, resistência à fratura, desgaste, contração e profundidade de polimerização (BASSIOUNY, GRANT, 1978; BRAEM et al,1987; KAWAGUCHI, FUKUSHIMA, MIYAZAKI, 1994).

Segundo Vantine (2001) as resinas compostas constituem-se de uma fase orgânica (ou matriz) e uma fase inorgânica (ou carga). Na composição da resina, encontra-se agente de carga que é responsável pela redução do coeficiente de expansão térmica. Embora a concentração de agente de carga varie de um produto comercial para o outro, apresenta-se geralmente na quantidade de 70% a 80%. Na maioria das resinas compostas, as fases (matriz e carga) são unidas através de agentes de união, exceção para os materiais que têm como material de carga a sílica coloidal pré-polimerizada, onde a ligação carga-matriz é obtida por embricamento mecânico.

Para Skinner (1986) uma melhor resistência e durabilidade do compósito, é essencial, uma união adesiva e estável, entre a resina e a carga. A ausência dessa união pode permitir que a carga se desloque da superfície, ou que ocorra penetração de água ao longo da interface matriz-carga. Por isso, o fabricante realiza uma cobertura na superfície da carga com um agente de união. Tais agentes atuam igualmente, absorvendo tensões na interface de carga e resina. De início foram usados os silanos vinílicos como agente de união. Eles foram substituídos por compostos mais reativos, como o gama-metacriloxipropilsilano.

Para Peutzfelt (1997) as resinas sofreram ao longo dos anos mudanças em sua formulação, mas a matriz orgânica manteve-se inalterada, ou seja, o monômero da resina permaneceu o mesmo. O Bis-GMA é o monômero mais usado como base da matriz das resinas compostas. Na matriz orgânica outros monômeros acrilatos aromáticos e alifáticos são utilizados como o TEGDMA e UEDMA. A porção inorgânica é composta por partículas muito pequenas de diâmetros microscópicos cuja finalidade é melhorar as propriedades físico-químicas principalmente a instabilidade dimensional da matriz. Os materiais mais comuns de reforço são: quartzo, sílica coloidal e vidros cerâmicos.

Segundo Skinner (1986) as resinas compostas são agrupadas em famílias (convencional, micro partículas, ultrafinas e híbridas), que estão relacionadas ao tamanho médio das partículas de carga que as constituem. A principal razão para diminuir o tamanho das partículas de carga foi para facilitar o polimento das resinas.

Segundo Cook (1982) com a diminuição no tamanho das partículas trouxe um inconveniente à redução da quantidade de carga na restauração, aonde este material chegava ao máximo a 40% de carga.

Segundo Kildal, Ruyter (1997), Souza et al (2005) a quantidade de carga inorgânica, tamanho, forma, e união a das partículas à matriz influenciam as propriedades físicas e mecânicas das resinas. Sendo que o aumento do tamanho e da quantidade de partículas inorgânicas melhora a resistência ao desgaste,

diminui a contração de polimerização, porém diminui o brilho e o polimento, desfavorecendo a estética.

2.5 MÉTODO DE POLIMERIZAÇÃO

Segundo Vieira et al (1998) um dos passos importantes para a melhora na aplicação dos materiais compósitos foi o aprimoramento do método utilizado para proceder-se à polimerização: a fotopolimerização. Inicialmente feita utilizando-se aparelhos que emitiam luz ultravioleta e atualmente valendo-se de aparelhos que emitem luz visível, a fotopolimerização trouxe duas vantagens fundamentais sobre o método anterior de ativação química: maior tempo de trabalho e menor possibilidade de incorporar bolhas na massa de resina, já que não há necessidade de espatular o material restaurador.

Segundo Denis (2007) as resinas fotopolimerizáveis, iniciam o seu processo de polimerização por absorção de luz, através da canforoquinona, que uma vez ativada reage com grupos amina para produzir radicais livres. Esta necessita de uma intensidade de luz visível, com um comprimento de onda entre 400 e 500 nanômetros. A maneira com que a luz por meio de sua unidade de energia os fótons ativa o fotoiniciador presente no material é devido a sua energia individual a qual é determinada pelo comprimento de onda.

2.6 FONTES DE FOTOPOLIMERIZAÇÃO

Segundo Vieira et al (1998) o aparelho fotopolimerizador tornou-se uma das ferramentas mais utilizadas na clínica diária. São vários os materiais atualmente disponíveis que dependem da ação do fotopolimerizador para que se tornem efetivos ou polimerizem. Além das resinas para restauração e cimentação, adesivos dentários e ionômeros de vidro, há também cimentos temporários,

cimentos periodontais e mesmo agentes clareadores que necessitam de um aparelho fotoativador.

2.6.1 Lâmpada halógena

Para Cook (1982), Ontiveros, Paravin (2006) estes aparelhos são os mais utilizados pelos profissionais da área para a fotoativação dos compósitos (Figura 2.2). Este aparelho emite luz, por um filamento de tungstênio contido dentro de um bulbo de quartzo que contém o gás de halogênio. A maior parte da energia produzida por esta fonte é de feixes infravermelhos, os quais são indesejáveis, são utilizados filtros nos aparelhos para selecionar apenas esta região azul e bloquear a emissão de comprimentos de onda indesejáveis.



Figura 2.2 – Aparelho Fotopolimerizador, contendo lâmpada halôgena.

Para Marso, Mattos, Sensi (2008) estes aparelhos apresentam algumas vantagens como tecnologia de baixo custo, boa intensidade de potência e emitem luz num espectro mais amplo. O potencial de cura de um fotopolimerizador no que tange à lâmpada reduz-se gradualmente durante sua vida útil, e a velocidade com que tal degradação ocorre é dependente do tempo de uso e do número de ciclos em que a lâmpada acende ou apaga durante um dado período. O conceito de potência uniforme durante toda a vida útil é provavelmente errado e os

próprios fabricantes recomendam averiguações freqüentes e reposição quando necessário.

2.6.2 LED

Para Vinagre et al (2004) para ultrapassar alguns problemas relacionados com os aparelhos de halogênio, a tecnologia LED (diodo Emissor de Luz) foi proposta para a fotopolimerização de materiais dentários. Há menos de cinco anos, o led só era usado como indicador luminoso de aparelhos como rádio, TV ou computador ligado. Com a evolução, ele deixou de ser um marcador para se transformar em emissor de luz visível.

Segundo Mills, Uhl, Jandt (2002) este aparelho não possui filamentos nem descarga elétrica, trabalha em baixa tensão, normalmente 10 ou 24 volts, e consome em média 1 watt, o que proporciona extrema economia de energia. Os LEDs baseiam-se em junções de semicondutores dopados (junções do tipo p-n) para gerar a luz, como consequência de um fenômeno de eletroluminescência em que a recombinação de um elétron e de uma lacuna numa junção p-n de um semicondutor leva à emissão de um fóton. O comprimento de onda de emissão depende do material do semicondutor, conduzindo no caso dos LEDs de Nitreto de Gálio, e sem recurso a filtros, à emissão de luz azul.

Segundo Vinagre et al (2004); Mills, Uhl, Jandt (2002) os aparelhos LEDs poderão ser menos potentes, mas apresentam um fluxo espectral mais estreito e seletivo para a canforaquinona, pelo que, a sua utilização deverá ser reservada a materiais que contenham apenas aquele fotoiniciador na sua composição ou outros que possuam o seu espectro de absorção máximo contido no mesmo intervalo. A quantidade de luz emitida pelas lâmpadas de halogênio sobre toda a região espectral é maior do que a emitida pelos LEDs. No entanto, na região de interesse, entre os 450 e os 470 nm, a quantidade de luz emitida pelos LEDs pode atingir o dobro da emitida pela lâmpada de halógeno. Esta é a

razão apontada por alguns autores para explicar a maior eficiência dos LEDs na polimerização das resinas compostas.

Vantagens associadas a estas fontes de luz LED prendem-se com o seu tempo de vida útil de cerca de 100 mil horas, sem alteração significativa do fluxo de luz ao longo do tempo e ao baixo consumo energético, o que dispensa manutenção, são munidos de baterias recarregáveis, permitindo a sua utilização portátil, conforme figura 2.3. O aquecimento gerado pelos LEDs no processo de polimerização é reduzido, pelo que nestes aparelhos não é incorporado qualquer sistema de ventilação, minimizando o ruído provocado. Por outro lado, as reduzidas dimensões dos LEDs pode permitir a sua incorporação diretamente na extremidade do fotopolimerizador, dispensando a necessidade de fibras ópticas para a transmissão da luz. A especificidade tecnológica usada na concepção destes aparelhos pode-lhes proporcionar, sob o ponto de vista ergonómico, diferenças significativas em relação aos fotopolimerizadores convencionais de halogéneo (VIEIRA,1998; MILLS, UHL, JANDT, 2002; VINAGRE et. al,2004).



Figura 2.3 – Fotopolimerizador, contendo Led.

2.7 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DUREZA DOS COMPÓSITOS RESTAURADORES

Uma propriedade importante que se deve considerar para a caracterização de materiais dentários é a sua dureza de superfície. Devido à relação que existe entre dureza e outras propriedades físicas, (BARATIERI et al,1995).

Soares (2002) diz que a dureza é a medida de efetiva polimerização e é, frequentemente, utilizada como um indicador do grau de conversão monômero-polímero e da profundidade de cura. A interpretação usual dada ao termo dureza é a de resistência a indentação. O conceito clássico de dureza fundamenta-se na resistência do material à penetração por uma ponta, sob carga específica, produzindo uma deformação permanente no mesmo.

Os testes clássicos de dureza por indentação são usualmente classificados em duas categorias: testes de macroindentação, para cargas maiores do que um quilograma, e testes de microindentação, para cargas com menos de um quilograma. Estes últimos são comumente usados em estudos comparativos de materiais dentários. A dureza de microindentação de materiais restauradores pode ser medida através de várias maneiras. As mais comuns em Odontologia são os testes de microindentação de Knoop e Vickers. A medida de microdureza de resinas compostas é difícil, devido à natureza específica destes materiais (as resinas compostas consistem de um componente inorgânico e um orgânico). As partículas de carga inorgânica são duras em comparação com a matriz resinosa macia. Algumas áreas da superfície de uma resina composta contêm uma quantidade proporcionalmente mais alta ou baixa de partículas de carga inorgânica. Medições de micro dureza feitas numa superfície heterogênea como a das resinas compostas levam a desvios-padrões mais altos, como os que foram para algumas resinas compostas (SOARES,2002).

Para Santos et al (2000) o grau de polimerização da resina composta muitas vezes é avaliado pela microdureza e está associado à intensidade de luz dos aparelhos fotopolimerizadores. Entretanto, nem sempre o aparelho com maior intensidade de luz é o de melhor qualidade, visto que outros parâmetros devem ser avaliados, como: tempo de fabricação da resina composta, tipo de aparelho fotopolimerizador, cor da resina, tempo de polimerização, tempo pós-polimerização, intensidade da luz.

2.8 FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS RESTAURADORES

A intensidade de luz emitida pelos aparelhos fotopolimerizadores tem sido considerada como sendo primordial na determinação do desempenho dessas unidades, uma vez que a variação dos valores de intensidade poderia resultar em alterações significantes na profundidade de polimerização das resinas (ARAÚJO et al., 1997). Outros fatores influenciam as propriedades das resinas como a composição do material, as partículas de preenchimento e o agente de união, as características da matriz da resina e o fator de configuração cavitária (fator C) (SOARES, 2002; FRANCO; FREITAS; D'ALPINO, 2000).

2.8 TEMPO DE EXPOSIÇÃO

Segundo Baratieri et al (1995) além da intensidade de luz, o tempo de polimerização também é um influenciador da profundidade de cura do material resinoso. De acordo com os resultados encontrados na literatura, pode-se observar que o tempo de exposição tem influência sobre a dureza superficial das resinas compostas, assim como em seu grau de conversão. Trabalhos mostraram que o grau de conversão das resinas polimerizadas com 20 segundos diminui a partir do primeiro milímetro, e a partir dos dois primeiros milímetros quando polimerizadas com 40 seg.

2.10 GRAU DE CONVERSÃO DAS RESINAS

Segundo Baratieri et al (1995) a qualidade da polimerização é determinada pelo grau de conversão do monômero em polímero, indicando a quantidade de grupos metacrilatos reativos que reagiram uns com os outros. Consequentemente existe um alto grau de dependência entre o sucesso da restauração e a capacidade

de polimerização da luz visível irradiada dentro de um determinado período de tempo e a presença de oxigênio durante a polimerização.

O grau de conversão é medido pela porcentagem de ligações duplas da resina capaz de converter-se em polímero. Este índice reflete a eficácia da polimerização, sendo que as resinas compostas fotoativadas dependem da eficácia da fonte fotoativadora, da estrutura dos monômeros e capacidade dos metacrilatos se difundirem através da matriz polimérica e reagir com os radicais terminais das cadeias, tipo e quantidade de partículas de carga, uma vez que a dispersão de luz nas resinas compostas ocorre devido às partículas e a distância da fonte de luz. A porcentagem de conversão pode ser medida por meio de espectroscopia de absorção no infravermelho (FTIR), (PEUTZFELDT,ASMUSSEN,2004), ou seja dos grupos metacrilatos remanescentes sem reagir. A porcentagem de conversão influencia uma série de propriedades das resinas compostas tais como: contração de polimerização, biocompatibilidade, desgaste. Limitando-se o grau de conversão, a contração pode ser minimizada. No entanto, uma alta conversão é importante para se conseguir boas propriedades mecânicas e boa biocompatibilidade, uma vez que grupos metacrilatos sem reagir poderão ser liberados causando efeitos citotóxicos (VENHOVEN, et al., 1993).

CAPÍTULO 3 DESGASTE DE MATERIAIS

3.1 INTRODUÇÃO

O fenômeno do desgaste é comum na grande maioria dos dispositivos mecânicos. A sua existência pode ser o fator determinante na quantificação da vida útil de tais dispositivos (REIS, ZAVAGLIA, 1999).

Segundo Gahr (1987) o desgaste apresenta-se como uma variável no dimensionamento de componentes que, normalmente, não é equacionável de maneira precisa. De acordo com as condições existentes na utilização do componente é possível saber qual o mecanismo de desgaste ocorrerá predominantemente, entretanto a intensidade deste é de previsão incerta e com um grande número de variáveis.

Segundo Reis, Zavaglia (1999) o desgaste pode ter significado maior do que simplesmente os custos das partes operantes. Existem casos em que tais custos estão ligados à qualidade de vida de um ser humano ou até mesmo a permanência da mesma, por exemplo: os problemas de desgaste relacionados às próteses de articulações sinoviais humanas. Estes conjuntos protéticos constituem sistemas tribológicos complexos e cuja compreensão tem se mostrado fundamental para ganhos de vida útil do conjunto e, conseqüentemente, melhoria da qualidade de vida dos pacientes. O estudo dos mecanismos de desgaste e da resistência ao desgaste em um sistema tribológico é fundamental para a otimização na escolha dos materiais envolvidos e para a previsão da durabilidade do sistema. Este tipo de estudo é, normalmente, feito através de ensaios em equipamentos que simulam as condições tribológicas existentes no funcionamento do sistema, na aplicação real. Desta forma, os equipamentos que se destinam à simulação de sistemas tribológicos devem ser específicos para o tipo ou o mecanismo de desgaste que se pretende estudar.

De acordo com a ASM (1995), existem vários tipos de desgaste. De um modo geral, podem-se classificar os tipos de desgaste em categorias:

1. Desgaste por deslizamento (adesivo);
2. Desgaste abrasivo;
3. Desgaste por Fadiga;
4. Desgaste erosivo;
5. Desgaste por cavitação;
6. Desgaste por Fretting;
7. Desgaste por disusão;
8. Desgaste por fusão e outros;

3.1.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo pode ser definido como o deslocamento de material causado por partículas ou protuberâncias de elevada dureza, sendo que estas são forçadas contra uma superfície sólida (BRISCOE, ADAMS 1987; DEUIS, 1996). Quando uma ou mais partículas de elevada dureza são atritadas contra uma superfície, sulcando-a ou escavando-a devido à força normal aplicada, tem-se o desgaste abrasivo de dois corpos. Por outro lado, quando estas partículas são aprisionadas entre duas superfícies que deslizam entre si, pode ocorrer o chamado desgaste abrasivo de três corpos (SOUZA, 2002).

Segundo Serbino (2005) ainda não existe uma teoria fundamental totalmente aceita para explicar o desgaste abrasivo, mas a maioria se baseia no conceito de que a abrasão é um processo de riscamento, porém simplificam o formato do penetrador, em geral cônico. Existem diversas equações usadas para relacionar desgaste e outras propriedades, como, por exemplo, a lei de desgaste de Archard (1956), introduzida em 1953 por J. F. Archard, que relaciona desgaste com dureza, expressando a proporcionalidade através do volume de desgaste por deslizamento (V), a carga normal (W), distância de deslizamento total (S) e a dureza (H) da superfície de contato, através da equação 3.1, onde k é uma constante de proporcionalidade.

$$V = (k.w.s)/3H \quad (3.1)$$

Este conceito ainda é utilizado como ponto de partida para o desenvolvimento de equações mais complexas.

Para Serbino (2005) a Figura 3.1, obtida por Kato (1990) mostra exemplos de três mecanismos de desgaste abrasivo no processo abrasivo, realizado com um penetrador com ponta arredondada contra uma superfície metálica. Para materiais dúcteis estes mecanismos podem ser observados, onde estes tipos de abrasão podem ser acompanhados de micro-trincamento superficial ou subsuperficial por um processo de fadiga mecânica (SERBINO,2005).

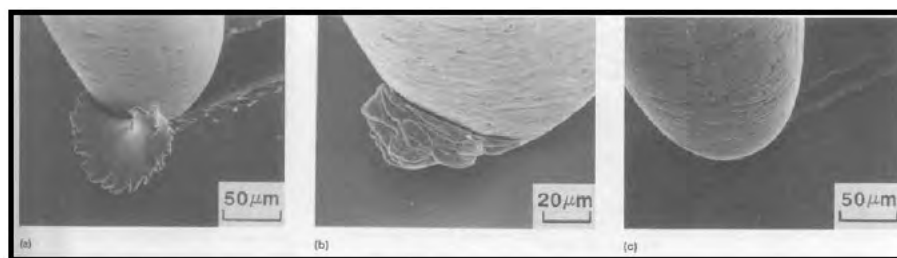


Figura 3.1 - Exemplos de três mecanismos de desgaste abrasivo, em metais dúcteis. a) Corte. b) Formação de cunha. c) Riscamento. Kato (1990).

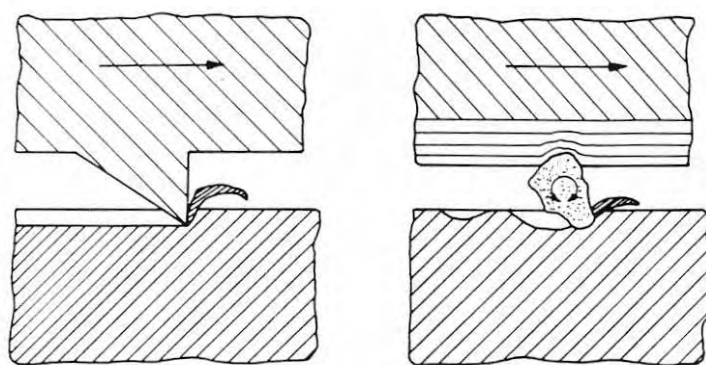
Nota-se que, dependendo do mecanismo abrasivo, pode ocorrer o simples deslocamento do material para os lados ou formação de uma cunha ou proa na frente do penetrador ou ainda um processo severo de corte no material.

Segundo a ASM (2000) a predominância do tipo de processo abrasivo pode ser influenciado pela carga, meio ambiente e superfície além de outros fatores de testes como: equipamentos, geometria do contato, tipo de movimento, velocidade, condições do ambiente, lubrificante usado, preparação do material e da superfície e rugosidade da amostra.

3.1.2 Tipos de Desgaste Abrasivo

Outra classificação largamente utilizada na literatura divide o desgaste abrasivo em dois modos principais: abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos (VERSUI et al., 1995; HUTCHINGS, 1992). Segundo Gates (1998) nesta definição a amostra é o ‘primeiro corpo’, o contra-corpo é o ‘segundo corpo’ e o abrasivo é o ‘terceiro corpo’. Define-se que ocorre desgaste a dois corpos quando as partículas ou asperidades estão rigidamente fixadas no segundo corpo, possibilitando, assim, riscos mais profundos no primeiro corpo. No desgaste a três corpos as partículas abrasivas estão livres, o que permite o rolamento destas entre a amostra e o contra-corpo que, conseqüentemente, gastam apenas parte do tempo atuando no riscamento da superfície.

Para Harsha, Tewari, Venkatraman (2003) no desgaste a três corpos, existem partículas duras se movendo entre as duas superfícies, onde dependendo dos ângulos instantâneos entre as extremidades destas partículas e as superfícies de contato, pode ocorrer um menor ou maior grau de penetração. Neste processo as partículas ficam aprisionadas entre as duas superfícies, como pode ser visto na figura 3.2 – (b). Os processos de desgaste podem ser lubrificados ou secos.



a - Abrasão de dois corpos

b – Abrasão de três corpos

Figura 3.2 - Desgaste de dois e três corpos - Fonte (Gahr, 1987, p.84)

3.1.3 Mecanismos do Desgaste Abrasivo

Silva, Mello (2006) quantifica a perda de massa no desgaste abrasivo em função dos mecanismos de desgaste predominantes, ou melhor, das características físicas do sistema que influenciam estes mecanismos. Apesar do caráter sistêmico do desgaste abrasivo, a literatura atual ressalta dois mecanismos de desgaste diferentes: (a) deslizamento das partículas, onde os abrasivos engastados no contra-corpo riscam a superfície removendo o material; (b) rolamento dos abrasivos, levando a indentações sobre o material, onde, em alguns casos, cada indentação pode ocasionar a remoção de material.

A Figura 3.3 mostra o mecanismo de desgaste conhecido como microsulcamento.

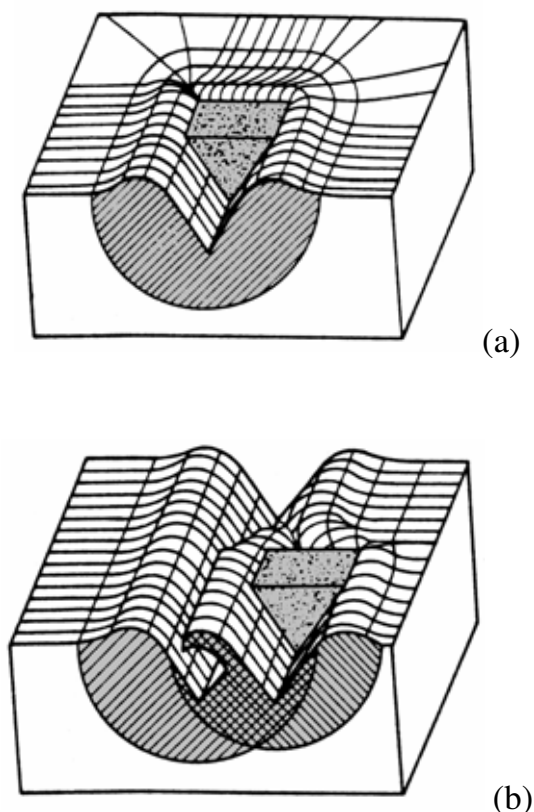


Figura 3.3 – Representação esquemática do microsulcamento (Gahr, 1987).

(a) microsulcamento (b) microsulcamento repetido, podendo ocorrer perda de massa.

Esse tipo de interação ocorre entre a partícula e o abrasivo em condições dúcteis. Este mecanismo consiste no deslocamento total do volume de material deformado plasticamente para as laterais do sulco formando saliências. Durante o microsulcamento não há perda de material efetivo, Figura 3.3 – (a) (Stachowiak, Batchelor 2001; Gahr, 1987; Hutchings, 1992).

Durante a abrasão várias partículas podem interagir simultaneamente ou sucessivamente. Se as condições de desgaste (carga, tipo de material e abrasivo) levam a um regime dúctil tem-se a ocorrência da interação descrita como microsulcamento repetidamente, nesse caso pode haver perda de material, Figura 3.3 – (b) (Stachowiak, Batchelor 2001; Gahr, 1987; Hutchings, 1992).

Entretanto, se as condições de desgaste não permitem grandes níveis de deformação plástica do material, ocorrerá o mecanismo chamado microcorte ou microriscamento, como descrito na Figura 3.4 (Gahr, 1987; Hutchings, 1992).

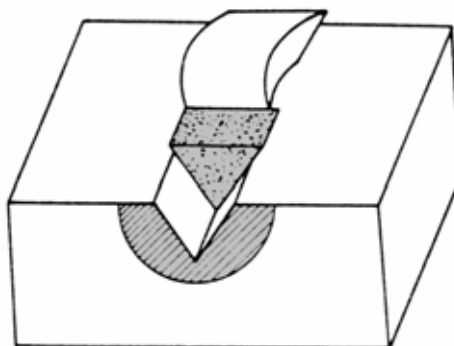


Figura 3.4 – Representação esquemática do microcorte ou microriscamento (Gahr, 1987).

Silva, Mello (2006) diz que neste tipo de mecanismo a perda de massa ocorre devido ao corte do material pelo abrasivo. Se as condições favorecem o microcorte puro o volume de material perdido é igual ao volume do risco produzido. Quando altos níveis de concentrações de tensão são impostas ao material pelas partículas, ou seja, quando o material é frágil particularmente na superfície de materiais duros, ocorrerá o microtrincamento. O esquema deste mecanismo está mostrado na Figura 3.5.

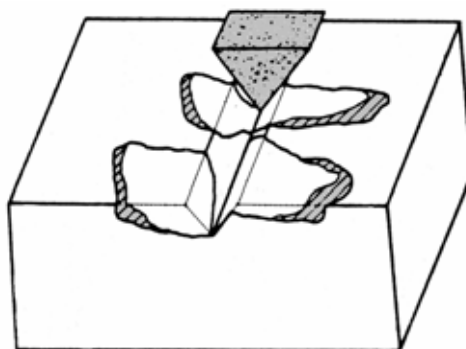


Figura 3.5 – Representação esquemática do microtrincamento (Gahr, 1987).

Segundo Trezona, Allsopp, Hutchings (1999) Buijs, Korpel-Van Houten, 1993; no microtrincamento há a interação entre o material e a partícula levando ao destacamento de grandes fragmentos. Estes fragmentos, maiores são a dimensão do próprio risco, acarretando a formação e a propagação de trincas durante o evento. Este mecanismo é típico de condições frágeis de desgaste. A perda de massa no desgaste abrasivo em função dos mecanismos de desgaste predominante, ou melhor, nas características físicas do sistema de desgaste influenciam estes mecanismos.

3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O DESGASTE ABRASIVO

Segundo Mondal et al (1998), a taxa de desgaste abrasivo e os mecanismos de desgaste podem ser influenciados por vários fatores como: o tamanho do grão abrasivo, a carga aplicada, a dureza dos materiais utilizados e a tenacidade à fratura. Já de acordo com outros autores (SOUZA, 2002), uma grande variedade de parâmetros influência os mecanismos de desgaste no geral, sendo que os principais são:

- parâmetros de material: composição, tamanho do grão, módulo de elasticidade, condutividade térmica, dureza, etc.

- parâmetros de projetos: forma, carregamento, tipo de movimento, aspereza, vibração, número de ciclos, etc.
- parâmetros de meio ambiente: temperatura, contaminação, umidade, atmosfera, etc.
- parâmetros de lubrificação: tipo de lubrificante, estabilidade de lubrificante, tipo de fluido, lubrificação, etc.

De acordo com Mondal (1998), a taxa de desgaste depende do tamanho do grão abrasivo, existe um valor crítico de tamanho de grão abrasivo acima do qual a taxa de desgaste se torna independente do tamanho do grão. Também é ressaltado que as diferenças nas durezas entre os dois corpos atritantes influenciam diretamente este tamanho crítico do grão abrasivo.

3.2.1. O Tamanho do Grão

De acordo Deuis et al (1996), o tamanho de um grão abrasivo tem uma influência direta nos mecanismos associados de desgaste. Eles caracterizaram o efeito do grão abrasivo pela relação, w/r , onde w era a espessura da ranhura e r era o raio esférico do topo da partícula (grão). Dependendo desta relação, a partícula de grão abrasivo irá deformar plasticamente ou cortar a superfície. Como as partículas desgastadas tornam-se cegas ou o tamanho da partícula diminui, o mecanismo de desgaste exibe uma transição do corte para o desgaste de delaminação. Isto explica o comportamento de muitas pequenas partículas abrasivas que mostraram o comportamento de um desgaste com microploughing. Para ambos os tipos de desgaste abrasivo (dois ou três corpos), um tamanho crítico da partícula abrasiva pode ser observado. O desgaste volumétrico aumenta com o aumento do tamanho do grão abrasivo para esta dimensão crítica. Sobre este valor crítico a taxa de desgaste é amplamente independente do tamanho do grão abrasivo. A forte diferença entre a dureza das partículas abrasivas e do material a ser desgastado influencia esta dimensão crítica do grão.

Durante o desgaste abrasivo, a extensão da região tencionada plasticamente abaixo da superfície depende do tamanho do grão abrasivo e da carga aplicada (DEUIS, 1996). A profundidade global da deformação plástica foi relatada linearmente para a aplicação de carga e dimensões de grãos.

3.2.2 A Carga Aplicada

Segundo Mondal et al (1998) a carga a ser aplicada sobre os corpos em atritos durante o processo de desgaste abrasivo também é um dos fatores que influenciam fortemente as taxas de desgaste no material. Um estudo propõe uma fórmula para quantificar a importância da carga aplicada no corpo de prova em relação ao tamanho do grão abrasivo em um desgaste abrasivo de dois corpos. Suas fórmulas permitem obter as taxas de desgaste abrasivo teórico nos processos de abrasão. Foram desenvolvidas fórmulas através de regressões lineares tanto para ligas como para materiais compostos

O efeito da carga na taxa de desgaste obtida tanto para os materiais compostos como para as ligas é bem mais severo que o efeito do tamanho dos grãos abrasivos. Sendo que em relação aos materiais por estes testados (ligas e compósitos), o efeito da carga e do tamanho do abrasivo na taxa de desgaste é relativamente maior no caso dos materiais compostos do que nas ligas. Porém, existem algumas combinações de tamanhos de grãos com o módulo das cargas aplicadas que podem fazer com que a taxa de desgaste abrasivo seja maior nas ligas do que nos materiais compostos (MONDAL et al,1998).

3.2.3 Dureza dos materiais utilizados

Segundo Catai (2004) na correlação entre desgaste por deslizamento adesivo e dureza, observou-se que o aumento na dureza da superfície implica em

uma redução na perda de massa, o que indica uma maior resistência da superfície testada ao desgaste. Na correlação entre este tipo de desgaste e risco, foi possível observar que o aumento da profundidade e da largura do risco acompanha o aumento da perda de massa das amostras ensaiadas.

Para Bru (2006) comportamento semelhante foi observado para os ensaios de desgaste por deslizamento abrasivo. No entanto, a perda de massa foi mais significativa neste ensaio devido à maior agressividade sofrida pela superfície da amostra. Na tentativa de correlacionar dureza, risco e desgaste verificaram-se que à medida que a dureza da superfície aumentou, menor foi a largura e a profundidade do risco e maior a resistência ao desgaste, seja ele por deslizamento adesivo ou abrasivo. Este resultado foi observado tanto no ensaio de risco com carga constante quanto no ensaio com carga progressiva. No estudo da relação entre as diversas técnicas utilizadas constatou-se ainda que o comportamento de largura e profundidade do risco depende da carga aplicada. Isto é particularmente importante para superfícies com gradiente de dureza, como observado na amostra temperada e nitretada. Desta forma, é importante que o responsável pela avaliação da superfície esteja treinado e apto para realizar esta avaliação.

3.3 EQUIPAMENTOS USADOS NA SIMULAÇÃO DO DESGASTE

Weil, Parker (1990) alguns testes foram criados para simular o desgaste em uma aplicação específica com o objetivo de caracterizar materiais, tratamentos superficiais ou lubrificantes para um dado tipo de serviço. Finalmente, alguns testes de desgaste são criados para a pesquisa fundamental sobre a natureza dos mecanismos de desgaste.

É importante salientar que existem ocasiões onde os ensaios normalizados não representam satisfatoriamente o comportamento do material em relação a uma dada situação. Nestes casos, é comum que sejam feitas modificações nos

testes normalizados com o objetivo de superar essas eventuais deficiências (BUDINSKI, 1995; STEVENSON, HUTCHING, 1996).

Dentre os vários métodos empregados para avaliar a resistência ao desgaste por abrasão de um material, o teste ASTM G-65, conhecido como “roda de borracha”, é o mais empregado (BLAU, BUDINSKI, 1999; GRIGOROUDIS, STEPHENSON, 1997; BUDINSKI, 1997; STEVENSON, HUTCHINGS, 1996). Neste método, as condições de desgaste abrasivo são produzidas sobre a peça testada através da rotação de uma roda de borracha sobre a superfície da mesma, com um abrasivo depositado por gravidade entre as duas superfícies, Figura 3.6.

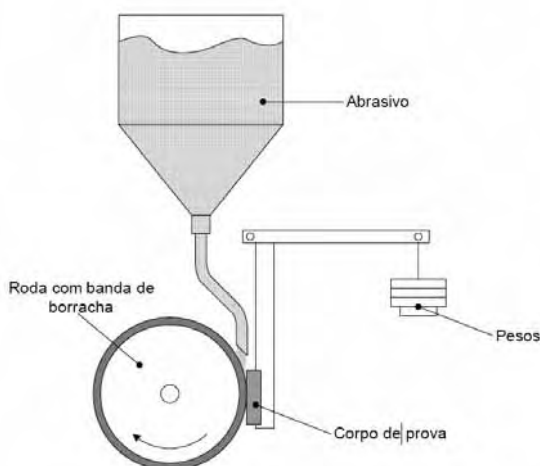


Figura 3.6 - Representação esquemática do teste de desgaste abrasivo ASTM G-65.

Para Valli, Palojarri e Makela (1985) os ensaios ASTM G-65 e ASTM G-76 apresentam como inconveniente a sua grande agressividade e baixa repetibilidade. Nesses casos e em situações especiais onde estes ensaios não representam de maneira satisfatória o fenômeno estudado, pode-se empregar ensaios de micro-abrasão, como o teste da esfera abrasiva. Este teste foi originalmente criado para determinar a espessura de revestimentos, Figura 3.7.

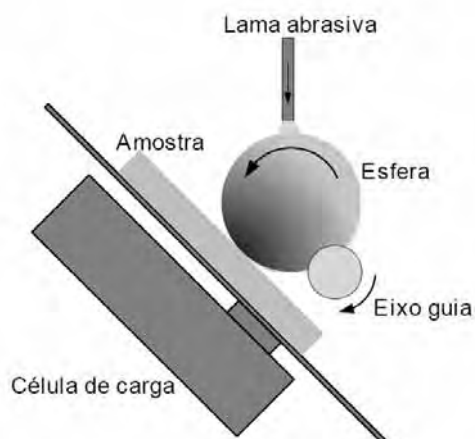


Figura 3.7 - Representação esquemática do ensaio de desgaste de micro-abrasão por esfera rotativa.

Existem duas configurações de equipamento para o ensaio do desgaste de micro-abrasivo: i) máquina de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera fixa e ii) máquina de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa (COZZA, 2006).

Uma aplicação típica deste ensaio se dá na caracterização tribológica de materiais revestidos, onde com os testes convencionais seria muito difícil, por exemplo, caracterizar separadamente revestimento e substrato. Nesse caso, os valores obtidos seriam uma combinação das propriedades de ambos (KASSMAN et al., 1991, RUTHERFORD, HUTCHINGS, 1997, LENCINA, 2004).

No teste da esfera abrasiva uma esfera de raio R é rotacionada contra um corpo de prova na presença de uma fina lama abrasiva. A forma da marca de desgaste reproduz a geometria da esfera, e o volume desgastado pode então ser determinado a partir da medição do diâmetro da cratera ou da sua profundidade, Figura 3.8.

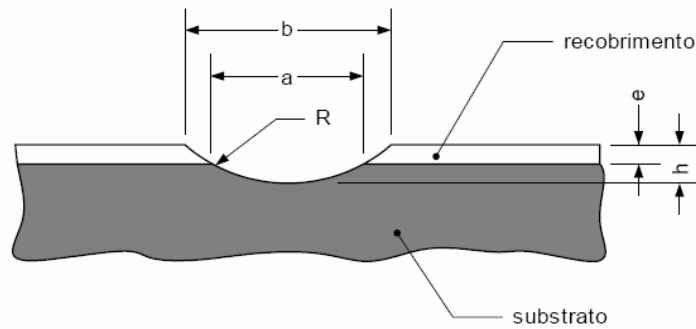


Figura 3.8 - Representação esquemática da seção transversal da cratera de desgaste provocada pelo teste da esfera abrasiva. As proporções das dimensões estão exageradas para melhor clareza.

Para materiais homogêneos (não revestidos), segundo Kassman et al. (1991), o volume desgastado, V , pode ser relacionado com a distância total de deslizamento da esfera, L , e a força normal desta sobre o corpo de prova, F_n , a partir da equação de Archer para o desgaste por deslizamento, equação 3.2.

$$V = \kappa L F_n \quad (3.2)$$

onde κ é o “coeficiente de desgaste” ou “taxa de desgaste específica” medida em $\text{m}^3 (\text{Nm})^{-1}$. A resistência ao desgaste abrasivo é definida como κ^{-1} e tem unidades $(\text{Nm})\text{m}^{-3}$.

Para uma marca de desgaste na forma de uma calota esférica produzida por uma esfera com raio R sobre um corpo de prova inicialmente plano, o volume desgastado pode ser calculado a partir do diâmetro, b , da cratera de desgaste, pela equação 3.3.

$$V = \frac{\pi b^4}{64R} \quad \text{para } b \ll R \quad (3.3)$$

O método pode ser estendido para materiais revestidos e os coeficientes de desgaste para recobrimento e substrato podem ser determinados em um único ensaio (KASSMAN et al., 1991; RUTHERFORD, HUTCHINGS, 1997). Também pode ser aplicado para corpos de prova com superfícies curvas usando equações adaptadas para o cálculo do volume desgastado (RUTHERFORD, HUTCHINGS, 1997; LENCINA, 2004).

Segundo Trezona, Hutchings (1999), o mecanismo de desgaste que predomina no ensaio depende significativamente da natureza do movimento das partículas na zona de contato, podendo variar entre movimento de “rolamento entre três corpos” a movimento de “entalhe entre dois corpos”, dependendo das condições do ensaio, da natureza das partículas abrasivas, do material da esfera e do corpo de prova.

Os trabalhos publicados sobre o teste de micro-abrasão da esfera e similares (KASSMAN, et al., 1991), têm se concentrado principalmente na caracterização de revestimentos duros, aplicação para a qual foi originalmente criado (RUTHERFORD, HUTCHINGS, 1996). Rutherford e Hutchings (1996, 1997), Rutherford et al. (1997), Gåhlin et al. (1997) aplicaram este ensaio sobre revestimentos finos de nitreto de titânio, alumínio, cromo e nióbio depositados sobre substratos de aço. (STAIA, ENRIQUEZ, PUCHI, 1997) utilizaram este ensaio para pesquisar revestimentos de níquel-fósforo depositados por *eletroless* sobre substratos de aço.

O ensaio da esfera abrasiva também tem sido aplicado sobre materiais relativamente macios como cobre (RUTHERFORD, HUTCHINGS, 1997), filmes poliméricos de tintas (RUTHERFORD et al., 1997) e polimetilmetacrilato (TREZONA, HUTCHINGS, 1999; LENCINA, 2004).

3.4 DESGASTE ABRASIVO EM AÇO: MECANISMOS E FATORES QUE O INFLUENCIAM

Segundo Trezona e Hutchings et al (1999) o mecanismo de desgaste predominante depende da natureza do movimento de partícula dentro o zona de contato; da força normal aplicada, da concentração de partículas do abrasivo na lama, da dureza do material ensaiado e fatores relacionados à natureza, ao tamanho e ao formato das partículas do abrasivo.

Gates (1998), faz uma análise crítica sobre a tradicional classificação da abrasão em dois-corpos e três-corpos e propõem a classificação dos mecanismos de desgaste abrasivo por deslizamento e desgaste abrasivo por rolamento.

Segundo Franco Júnior (2003) no desgaste abrasivo por deslizamento, a partícula abrasiva, que atua como uma aspereza dura, fica aderida à esfera de ensaio (contra-corpo), deslizando sobre a superfície do material. Com isso, na direção do desgaste é produzida uma série de riscos paralelos. Já no desgaste abrasivo por rolamento, a partícula abrasiva rola sobre a superfície da amostra, produzindo uma grande quantidade de indentações. Diferentemente do desgaste abrasivo por deslizamento, neste tipo de desgaste não fica evidenciada a direção do desgaste.

Segundo Trezona, Allsopp, e Hutchings (1999) estes concluíram quando estudaram um aço ferramenta temperado e revenido, e apresentam parte dos resultados, na forma de mapas de mecanismos de desgaste, conforme na Figura 3.9 e as figuras 3.10 e 3.11 mostra os aspectos típicos da superfície das crateras de desgaste produzidas em cada uma das regiões destacadas na Figura 3.9.

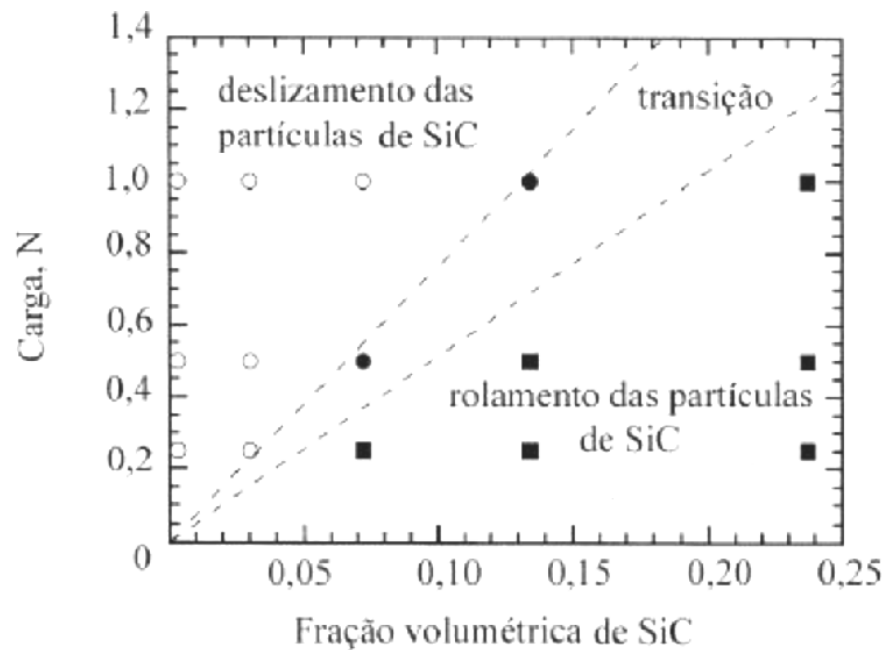


Figura 3.9 – Mecanismos de desgaste microabrasivo em função da concentração de SiC e da carga de ensaio para um aço ferramenta temperado e revenido (775 HV). Abrasivo:SiC (4,25 μ m) (Trezona, Allsopp, e Hutchings ,1999).

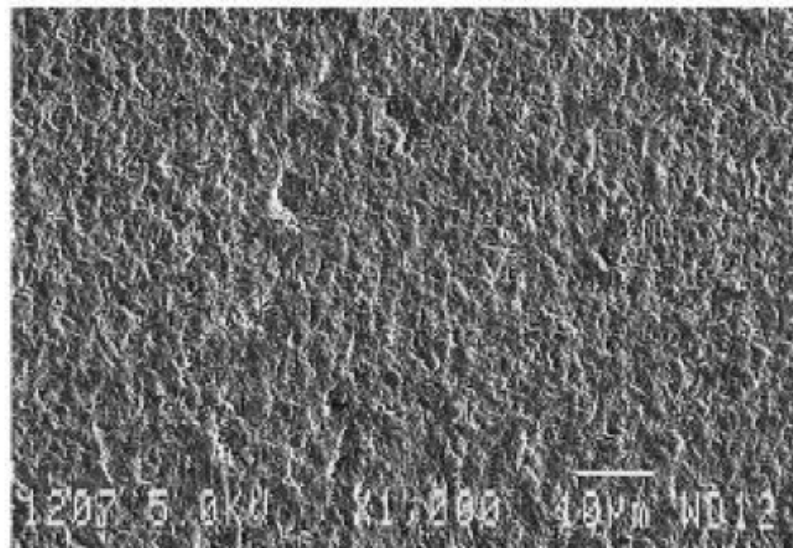


Figura 3.10 - Superfície de desgaste de um aço ferramenta temperado e revenido após ensaio de microabrasão. Fração volumétrica de SiC de 0,237 (1,0 g.cm-3) e carga aplicada de 0,25 N (Trezona, Allsopp, e Hutchings, 1999).

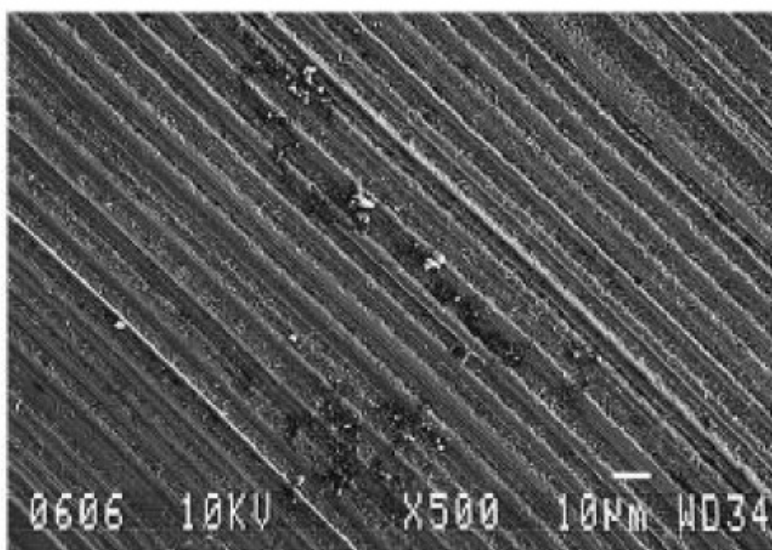


Figura 3.11 - Superfície de desgaste de um aço ferramenta temperado e revenido (775HV) após ensaio de microabrasão. Fração volumétrica de diamante na lama abrasiva de 0,0009 ($0,003\text{g cm}^{-3}$) e carga de ensaio de 0,25 N. (Trezona, Allsopp, e Hutchings, 1999).

Segundo Trezona, Allsopp, e Hutchings (1999) o rolamento, característico do desgaste abrasivo a três-corpos, é dominante quando são usadas lamas abrasivas com altas concentrações de *SiC* e quando são aplicadas cargas baixas, Figura 3.9. Neste tipo de desgaste, não é possível distinguir a direção do movimento da esfera (contra-corpo) sobre a superfície da amostra, conforme se pode observar na Figura 3.10. As partículas de *SiC* rolam sobre a superfície da amostra, provocando uma grande quantidade de indentações. Segundo Trezona e colaboradores, com o aumento da carga de ensaio e da concentração de *SiC* na lama, o mecanismo de rolamento ainda prevalece uma vez que a indentação da superfície da amostra por cada uma das partículas se dá suavemente.

Na Figura 3.9, verifica-se que o riscamento, característico do desgaste abrasivo a dois-corpos, é dominante quando são usadas lamas abrasivas com baixas concentrações de *SiC* e/ou altas cargas. No movimento do contra-corpo (esfera), o riscamento ocorre quando uma grande quantidade de partículas do abrasivo fica engastada na superfície da esfera, as quais atuam como penetradores fixos. Com o aumento do carregamento, as partículas indentam

mais profundamente a superfície do material e, com isso, é produzida uma série de riscos finos e paralelos, como mostra a Figura 3.11. Trezona e colaboradores (1999) argumentam que os riscos são de fato formados pela ação das partículas do abrasivo, não pela ação das asperezas da esfera, uma vez que existe uma correspondência entre o tamanho dos riscos formados e o tamanho do abrasivo usado.

Segundo Trezona Allsopp, e Hutchings (1999) na Figura 3.9 nota-se uma região de transição de mecanismos na qual podem ocorrer concomitantemente o deslizamento e o rolamento das partículas de *SiC*. Na caracterização das crateras de desgaste, Trezona e co-autores (1999) mostram que o centro das crateras apresenta sulcos e a sua periferia, além dos riscos, algumas indentações. Até cargas de 1 N , a ocorrência simultânea dos dois mecanismos de desgaste pode ser prevista por uma equação linear, na qual a fração volumétrica do abrasivo de *SiC* deve ser cerca de sete vezes a carga aplicada.

3.5 VARIAÇÃO DA TAXA DE DESGASTE OU COEFICIENTE DE DESGASTE X REGIME DE DESGASTE

Para se obter a região de transição entre um regime de desgaste para o outro, pode ser por meio da variação da taxa de desgaste ou coeficiente de desgaste.

Hutchings (1992 apud COZZA, 2006) em seu estudo relacionou a taxa de desgaste em relação à concentração de partículas abrasivas e observou que a variação da taxa de desgaste torna-se extremamente sensível à variação da dureza do abrasivo. A forma dos abrasivos também é importante no processo de desgaste, onde partículas pontiagudas podem ocasionar taxas de desgaste bem maiores do que partículas com pontas arredondadas.

A dureza do abrasivo desempenha papel fundamental durante o processo de desgaste. Para uma mesma dureza da superfície H_S , quanto maior a dureza do

abrasivo, H_A , maior a taxa de desgaste da superfície e quanto menor a dureza do abrasivo, menor a taxa de desgaste. Entretanto, mesmo que $H_S > H_A$, ocorrerá desgaste.

A razão $\frac{H_A}{H_S}$ onde pode ser utilizada para prever os regimes de desgaste abrasivo Kruschov (1957 apud PINTAÚDE, 2002). Se $\frac{H_A}{H_S} < 1$, o regime de desgaste será denominado *moderado*, ou também chamado de *abrasão dúctil*. Se $\frac{H_A}{H_S} > 1,2$, o regime de desgaste abrasivo será classificado como *severo*, ou *abrasão dura* (Hutchings, 1992 apud COZZA, 2006). As taxas de desgaste envolvidas no regime severo de desgaste abrasivo são relativamente maiores que as taxas de desgaste apresentadas no regime moderado de desgaste abrasivo. A variação da taxa de desgaste em função de $\frac{H_A}{H_S}$ pode ser esquematizada através de um gráfico da Figura 3.12.



Figura 3.12 - Relação esquemática entre a taxa de desgaste e a razão H_A/H_S . Os pontos p_1 e p_2 limitam a região de transição entre os regimes de desgaste Kruschov, 1957 apud Pintaúde, 2002).

Na Figura 3.12, observa-se uma região de transição entre os dois regimes de desgaste abrasivo, limitada pelos pontos $p1$ e $p2$, nos quais a razão $\frac{H_A}{H_S}$ vale 1 e 1,2, respectivamente (Kruschov, 1957 apud PINTAÚDE, 2002).

No regime moderado de desgaste abrasivo $\frac{H_A}{H_S} < 1$ a dureza do material que sofre desgaste é sempre maior que a dureza do abrasivo. Logo, mantendo-se H_A constante, há pouca variação da taxa de desgaste com o aumento de H_S (aumentando-se H_S , a razão $\frac{H_A}{H_S}$ diminui). Isso demonstra que, nessa região, a variação de H_S apresenta pouca influência no processo de desgaste. Na região de desgaste abrasivo severo $\frac{H_A}{H_S} > 1,2$ é observado um efeito semelhante.

3.6 DESGASTE ABRASIVO EM POLÍMEROS E COMPÓSITOS, MECANISMOS E FATORES QUE INFLUENCIAM.

Segundo Kawakame (2003) devido as grandes mudanças ocorridas neste último século, presenciamos um maior número de componentes em polímeros de engenharia substituindo os metais mais tradicionais em diversas aplicações, obtendo-se em muitos casos maiores vantagens como reduções de custos de manutenção, ganho em peso, maior liberdade de projeto. Citamos alguns exemplos de aplicações: mancais auto – lubrificantes guias lineares, selos mecânicos, buchas, gaiolas de rolamento, correias transportadoras, engrenagens, polias. Estes componentes por sua vez são cada vez mais solicitados nos aspectos de resistência à fadiga e resistência ao desgaste.

Segundo Trezona (1999); Shipway, Ngao (2003) o desgaste abrasivo de polímero e combinações polímero com base em compósitos é um assunto de importância na literatura. Vários tipos de teste são empregados; dois-corpos e de três-corpos são utilizadas. A maioria dos testes empregam o teste de abrasão de

dois-corpos por este ser mais fácil execução, e a abrasão de três-corpos devido ao estudo maior de materiais compósitos, este teste ganhou espaço na literatura, e desde de então vem sendo empregado no estudo de materiais compósitos.

O objetivo da dissertação de Jesus (1998) foi a obtenção de compósitos de matriz metálica (CMM) pela rota da metalurgia do pó, e a avaliação destes quanto às suas características de usinagem e desgaste. Inicialmente foram obtidos materiais compósitos de matriz de alumínio comercialmente puro, com frações volumétricas de partículas de reforço de carboneto de silício iguais a 5, 10 e 15 %. Foi obtida também uma quantidade de material somente com o material da matriz (sem partículas de reforço) para que se pudesse durante o trabalho, verificar por comparação a influência da adição de material de reforço na matriz. O material obtido foi caracterizado física (densidade hidrostática) mecânica (dureza, ensaios de tração) e microestruturalmente (microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura). Os resultados mostraram para os materiais compósitos uma distribuição homogênea das partículas de reforço e melhoria das propriedades mecânicas principalmente o limite de resistência (LR) em relação ao material sem reforço. Na etapa seguinte foram realizados ensaios para verificação do comportamento dos materiais frente à usinagem, e avaliação de desempenho de diversos materiais de ferramenta (carboneto cementado, cerâmica e diamante policristalino). Nestes ensaios foram coletados valores de força de corte a partir de porta-ferramentas instrumentados com medidores de deformação. Fenômenos tais como desgaste da ferramenta, formação ou não de aresta postiça de corte e formação de cavaco também foram observados e avaliados. Os resultados encontrados nos ensaios com ferramenta de carboneto duro sinterizado foram utilizados para a determinação dos índices de usinabilidade de cada material; estes valores foram ainda aplicados na equação de Taylor e as constantes da equação para os materiais e condições de ensaio foram também determinadas. Os resultados mostraram que a inclusão de partículas de reforço cerâmico torna extremamente difícil a usinagem desses materiais e, somente com ferramenta de diamante foi possível obter resultados satisfatórios. Na fase final foram realizados testes de desgaste de efeito

comparativo para verificação da influência da adição de partículas de reforço nas características de resistência ao desgaste do material. Neste caso a adição de partículas de reforço mostrou ser eficiente na melhoria da resistência ao desgaste de todos os materiais compósitos em relação ao material sem reforço.

Segundo Jesus (1998) as regiões fraturadas nos ensaios de tração foram observadas e avaliadas em microscópio eletrônico de varredura. Pelas imagens é possível verificar que em relação ao material sem reforço que apresentou fratura dúctil (figura 3.13 (d)), predomina nos materiais com 5 %, 10 % e 15% de reforço, fratura com características de maior fragilidade (figuras 3.13 (a, b, c e d)).

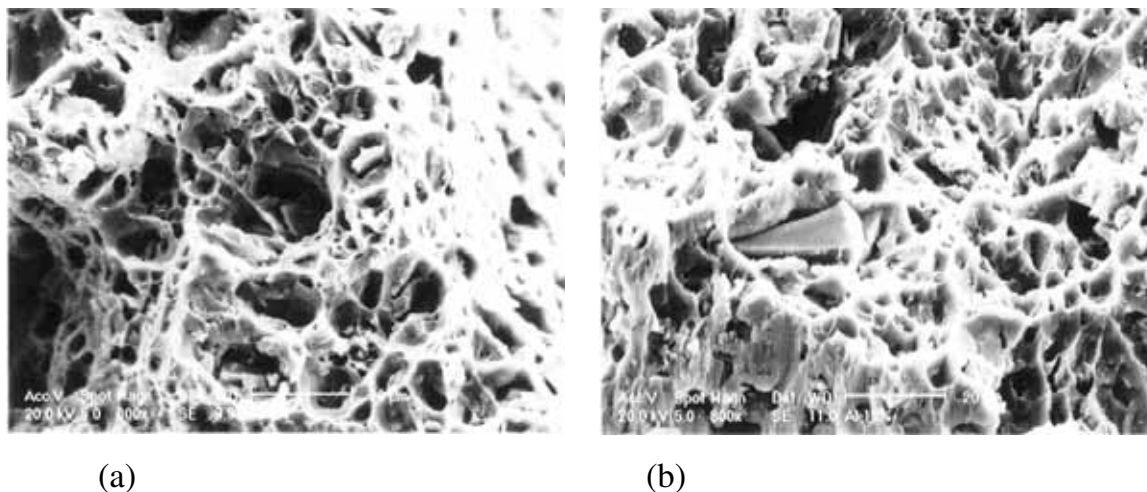


Figura 3.13 –Micrografia eletrônica de varredura mostrando o aspecto das regiões fraturadas nos ensaios de tração para o material sem reforço e para o material compósito com diferentes frações volumétricas de SiC. (a) Al/SiC 5 %, (b) Al/SiC 10 % (JESUS,1998).

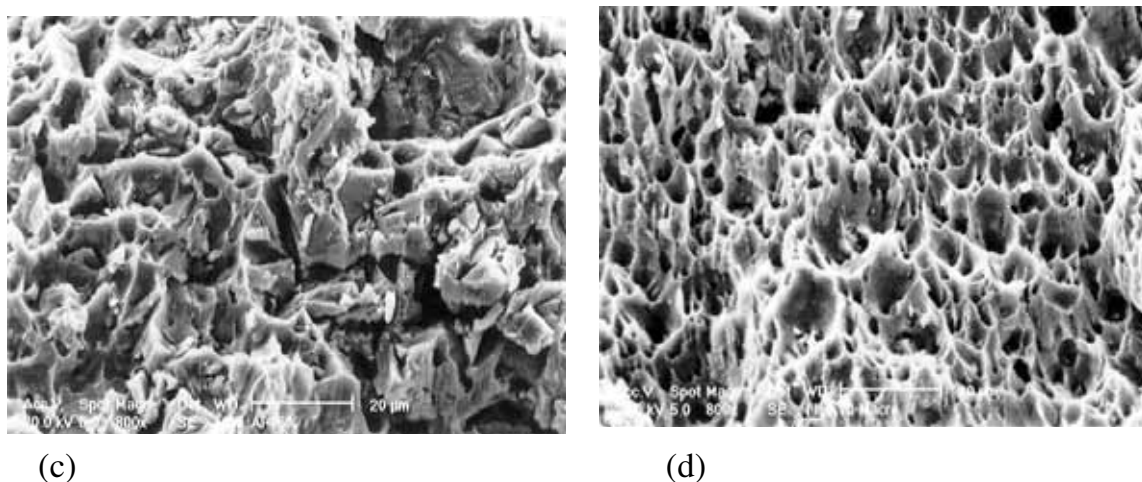
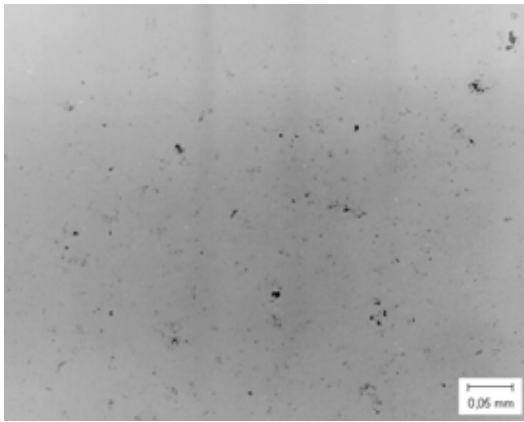


Figura 3.14 –Micrografia eletrônica de varredura mostrando o aspecto das regiões fraturadas nos ensaios de tração para o material sem reforço e para o material compósito com diferentes frações volumétricas de SiC. (c) Al/SiC 15%, (d) Al/SiC 0 % (JESUS,1998).

Pela Metalografia das figuras 3.15 (c-h) Jesus (1998) verificou que para os materiais com 5 %, 10 % e 15 % de reforço, a existência de aglomerados de material de reforço no material da matriz. É fácil imaginar o porquê dessa tendência, já que existe uma diferença significativa entre os tamanhos das partículas de pó de alumínio e SiC utilizados na produção do material. As partículas de SiC têm em média tamanho 4 vezes menor e, por isso tendem a se concentrar nos interstícios do pó de alumínio. Mais uma vez é verificada a influência da relação entre tamanho de partículas na formação de aglomerados, essa relação é igual a 0,27. O ideal é que este valor esteja muito próximo de 1.

Para Jesus (1998) ainda, para os materiais compósitos não é tão evidente pelas figuras a diferença entre eles na quantidade de material de reforço presente no material da matriz, também a quantidade de reforço em cada material aparenta ser maior do que a que realmente deveria haver. A explicação para estas observações pode estar associada à impregnação de partículas de SiC no material da matriz dos compósitos, oriundas das lixas utilizadas na etapa de lixamento das amostras destes materiais. Este impasse culminou com a dissolução química de

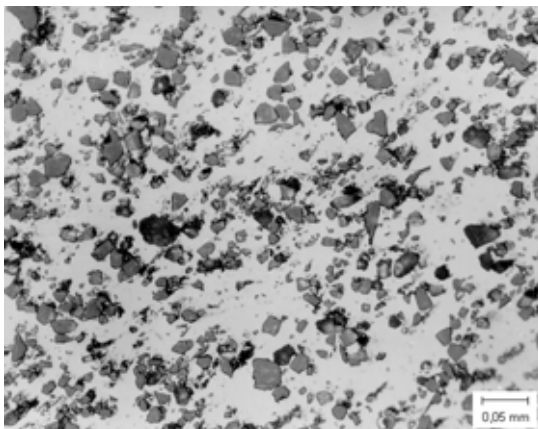
amostras dos compósitos, objetivando a extração do reforço para a determinação da quantidade real de partículas de reforço presente em cada um.



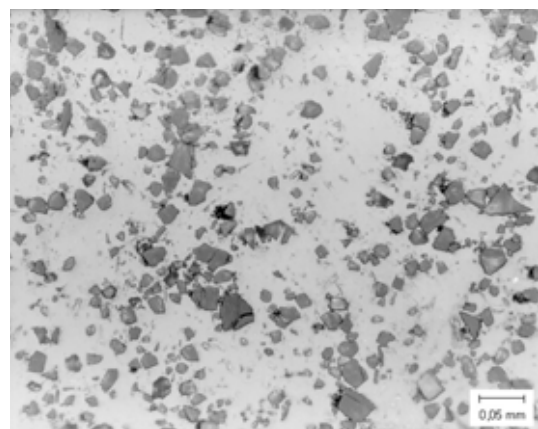
(a)



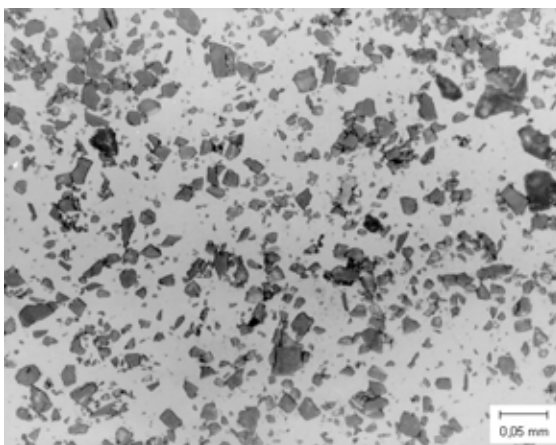
(b)



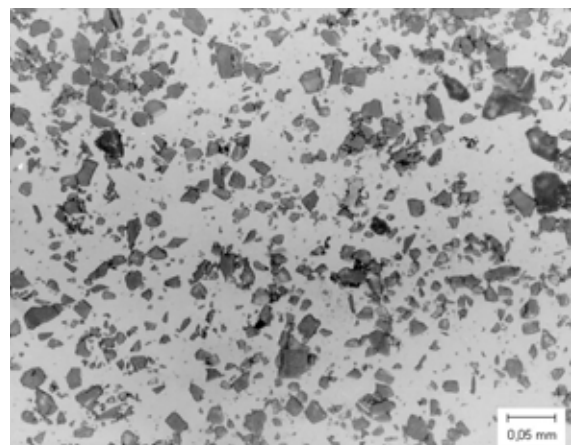
(c)



(d)



(e)



(f)

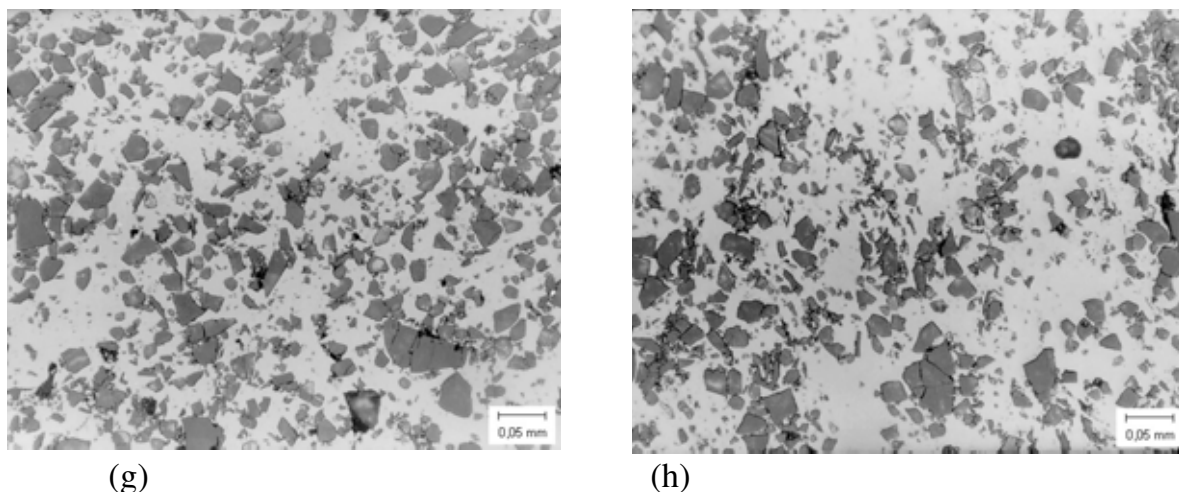


Figura 3.15 – Micrografias ópticas mostrando o aspecto microestrutural do material sem reforço e do material com diferentes frações volumétricas de SiC (sem ataque). (a) Al/SiC 0 % - secção transversal; (b) Al/SiC 0 % - secção longitudinal; (c) Al/SiC 5 % - secção transversal; (d) Al/SiC 5 % - secção longitudinal; (e) Al/SiC 10 % - secção transversal; (f) Al/SiC 10 % - secção longitudinal; (g) Al/SiC 15 % - secção transversal; (h) Al/SiC 15 % - secção longitudinal (JESUS,1998).

3.6.1 Desgaste Abrasivo em Compósitos Restauradores

O desgaste abrasivo das resinas compostas convencionais é descrito como um processo onde ocorre a esfoliação das partículas de material inorgânico e a matriz da resina é continuamente desgastada.

A microabrasão da matriz ocorre sob tensão e sob a ação abrasiva do alimento, causando a exposição das partículas inorgânicas e o conseqüente aumento da tensão. Juntamente, a fadiga mecânica é outro fator que também influencia no desgaste. Com o movimento dos dentes durante a mastigação, tensões cíclicas, juntamente com carregamentos e descarregamentos, podem iniciar e propagar microtrincas.

Além disso, a deterioração das restaurações é ainda acelerada pela diferença entre os módulos de elasticidade da matriz e da carga. Observações das restaurações realizadas com estes tipos de resinas em superfícies oclusais

(faces mastigatórias dos dentes) revelaram que a perda de material é normalmente uniforme.

Então, dentre os vários fatores determinantes do processo de desgaste abrasivo, encontram-se, genericamente, as características da própria resina e do preparo cavitário, assim como da restauração confeccionada e das condições das agressões a que ela for submetida. (AGUIAR,2003).

Para Heintze et al (2006) o desgaste é comum no ramo da odontologia, este depende de diferentes fatores que ocorrem simultaneamente. Partindo do princípio que o mecanismo de desgaste intrabucal é um fenômeno multifatorial, já que abrange fatores químicos como a composição salivar, tipo de bactérias e ácidos produzidos, pH, dieta alimentar; fatores motores, como o padrão de oclusão e força dos músculos orofaciais, presença de hábitos parafuncionais, como bruxismo e apertamento, e também os tipos de materiais restauradores presentes na boca.

O processo de desgaste dental tem como agente principal, a ação mecânica que está relacionada com a carga aplicada, força, tipo de contato entre os dentes; e presença de fatores erosivos, abrasivos na cavidade oral (DAHL et al., 1993; MAIR et al., 1996) e outras condições associadas.

3.6.2 Mecanismo de Desgaste em compósitos

Em estudos clínicos e laboratoriais, observou-se a ocorrência de desgaste por abrasão nos elementos dentários submetidos à escovação, com grandes variações de escovas dentárias e substâncias abrasivas aplicadas (WANG, 2001).

O desgaste de materiais restauradores é um processo complexo que envolve um número de diferentes mecanismos de desgaste dependendo do material e do paciente (DAHL e OILO, 1994, WANG, 2001). O exato mecanismo de desgaste na cavidade oral não é conhecido, mas sabe-se que pode envolver vários modelos.

De acordo Mair et al (1996 apud COSTA, 2007), a resposta de um compósito à passagem de uma superfície áspera e dura depende do tamanho das partículas do compósito comparada com a escala da deformação causada pela superfície oposta em contato. Se a deformação for maior que o tamanho das partículas duras da matriz e o espaço entre elas, os materiais comportar-se-ão como um sólido homogêneo (Figura 3.16.a) e a taxa do desgaste será similar àquela da resina. Se as partículas da matriz forem comparáveis no tamanho com a escala da deformação ou maior, então o material comportar-se-á como um contínuo heterogêneo e a taxa do desgaste serão menores (Figura. 3.16.b). Entretanto, pode haver uma separação entre as fases, podendo conduzir a um dano de subsuperfície.

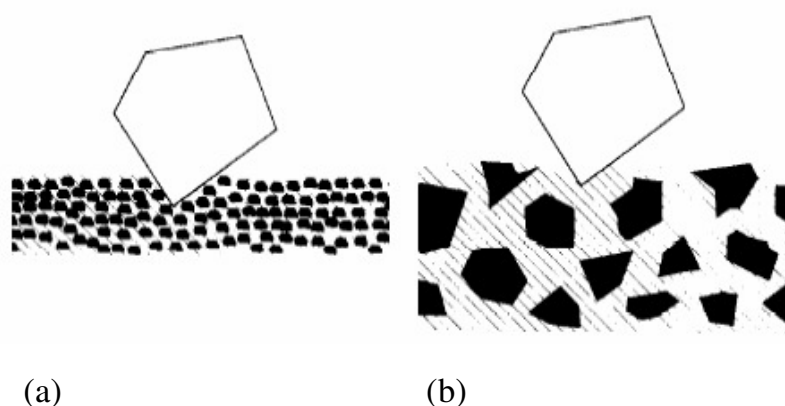


Figura 3.16 – Desgaste de Compósitos. (a) O tamanho das partículas é bem menor que a deformação causada pela superfície oposta. (b) As partículas são grandes e compatíveis com a deformação causada superfície oposta (MAIR,1996).

Whitehead et al (1999) a abrasão é gerada pelo deslizamento de um dente sobre o outro com a força sendo transmitida através da camada de alimento que funciona como o terceiro corpo. A atrição resultante do contato direto de dentes opostos possui um nível de carregamento excessivamente mais elevado que o carregamento que causa a abrasão.

Segundo Lim et al (2002) o processo de abrasão envolve o desgaste do material macio por um material abrasivo mais duro. Portanto, esta é a razão para

a adição de partículas inorgânicas duras em uma matriz resinosa macia a fim de alcançar uma melhor resistência à abrasão. Foi sugerido que a tecnologia de partículas de enchimento, particularmente a composição, o tamanho e o volume ocupado por estas partículas na formulação do compósito, tenham um potencial para influenciar a desempenho abrasivo de um compósito.

3.6.3 Desgaste Abrasivo X Tamanho das Partículas de Enchimento dos Compósitos

Jorgensen, Asmussen, (1978) e Lim et al. (2002) propuseram que o decréscimo do espaço interpartículas, o qual é melhor obtido com partículas de tamanhos menores, foi a chave para melhorar a resistência a abrasão. Uma redução do espaço entre as partículas dos compósitos é conseguida tanto pelo decréscimo de tamanho quanto pelo acréscimo da fração volumétrica das partículas.

Segundo Lim et al. (2002), conforme o volume de partículas aumentava, o desgaste foi reduzido, independente do tratamento com agentes de união. Os resultados deste estudo sugeriram que a adição de partículas no compósito aumenta sua resistência ao desgaste, mas que a resistência ao desgaste ideal só pode ser alcançada se as partículas forem bem aderidas à matriz resinosa. O compósito microparticulado que apresentou a maior porcentagem de partículas inorgânicas, a dispersão de partículas mais homogênea e a melhor adesão química entre partícula e matriz resinosa foi a que apresentou a melhor resistência ao desgaste.

Turssi, Ferracane e Serra (2005) avaliaram os materiais compósitos contendo diferentes tamanhos e formas de partículas e viram que estas interferem na resistência ao desgaste. Partículas menores têm sido utilizadas para diminuir o espaçamento entre as partículas e reduzir o desgaste. No que se referem à geometria das partículas, diferentes formas representam diferentes áreas de superfície o que afeta a quantidade de matriz resinosa na região entre as

partículas. Contudo, mesmo com tantos estudos, nenhum consenso tem sido alcançado sobre de que forma partículas irregulares ou esféricas possuem performances tribologicamente e mecanicamente melhores. Com base neste estudo, TURSSI et al. (2005) concluíram que o tamanho e forma de partículas provaram ser capazes de controlar o desempenho no desgaste dos compósitos. Em geral, a magnitude da perda de material deve ser reduzida pelo decréscimo do tamanho das partículas. A presença de pequenas partículas do compósito em uma específica combinação pode melhorar a resistência ao desgaste.

CAPÍTULO 4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 COMPÓSITOS

Neste trabalho foram utilizadas duas marcas de compósitos restauradores uma de fabricação nacional e outra importada, ambas comerciais. Na Tabela 4.1, é representada a cor, o tipo, matriz, carga, a propriedade física e a composição química destes compósitos restauradores, fornecida pelo fabricante.

Tabela 4.1- cor , propriedade física e composição dos compósitos

Compósito	Compósito I (Resina Importada)	Compósito II (Resina Nacional)
Tipo	Micro híbrida	Micro híbrida
Cor	Incisal	Incisal
Matriz Orgânica	BIS-GMA, UDMA e BIS-EMA,	Bisfenol A(BPA), BIS-GMA, Di-Etilmetacrilato de Trimetilhexildiuretano, Cerâmica de Vidro, Dióxido de Silício, Dióxido de Titânio e Óxido de Ferro
Carga Inorgânica	Zircônia e sílica	Vidro de bário
Tamanho das partículas de enchimento	0,19 -3,3 µm	0,04 -2,2 µm
Percentual de Carga Inorgânica	77,6 % em peso 60% em volume	80% em peso 79% em volume

4.2 ESFERA DE AÇO

A esfera utilizada no ensaio de desgaste de microabrasão foi de 15mm de diâmetro de aço ASTM 52100. Na tabela 4.2, mostra a composição química e a dureza deste aço.

Tabela 4.2 - composição química e dureza do aço ASTM 52100.

Designação do Produtor	Designação Técnica	Carbono C	Cromo Cr	Manganês Mn	Dureza Rockwell Recomendada
VC-52	52100	1,05	1,45	0,35	56-59

4.3 PARTÍCULA ABRASIVA

A partícula abrasiva utilizada foi o óxido de alumínio (Alumina) de 0,3 μm .

4.4 APARELHOS FOTOPOLIMERIZADORES

Os aparelhos utilizados no processo de polimerização estão enumerados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Aparelhos Fotopolimerizadores

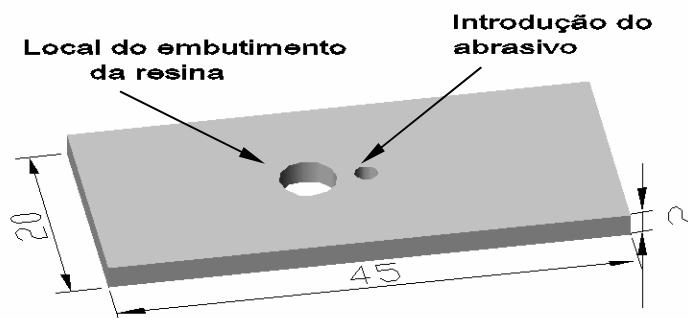
Modelo	Lâmpada	Intensidade	Diâmetro do bico	Potência
AH	halógena	452 m W/cm ²	7mm	171mW
BH	halógena	700 m W/cm ²	10mm	891mW
CL	LED	680 m W/cm ²	11mm	716mW

* Os valores de intensidade foram obtidos através do aparelho radiômetro.

4.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

(a) Preparação dos corpos-de-prova

As amostras dos compósitos foram confeccionadas em uma matriz de chapa de alumínio medindo 45 mm de comprimento, 20 mm largura e 2 mm de espessura. Na parte central da matriz existe um orifício de 5 mm, onde foi embutido o compósito e outro de 2 mm para a introdução do abrasivo, conforme Figura 4.1.



(a)



(b)

Figura 4.1 – (a) Representação esquemática da matriz de alumínio, com as respectivas medidas. (b) Matriz de alumínio, utilizada na confecção das amostras.

A obtenção das amostras do compósito obedeceu a seguinte seqüência: sobre uma placa de vidro foi colocada a matriz de alumínio, as duas foram presas, formando o molde para a inserção dos compósitos (resinas). Este molde foi preenchido com o compósito em uma porção única, com o auxílio de uma espátula de aço. Outra lâmina de vidro foi posicionada sobre a matriz, com o intuito de tornar plana e uniforme a superfície da amostra, pela pressão digital impressa sobre as lâminas, fazendo escoar possíveis excessos do compósito, Figura 4.2.

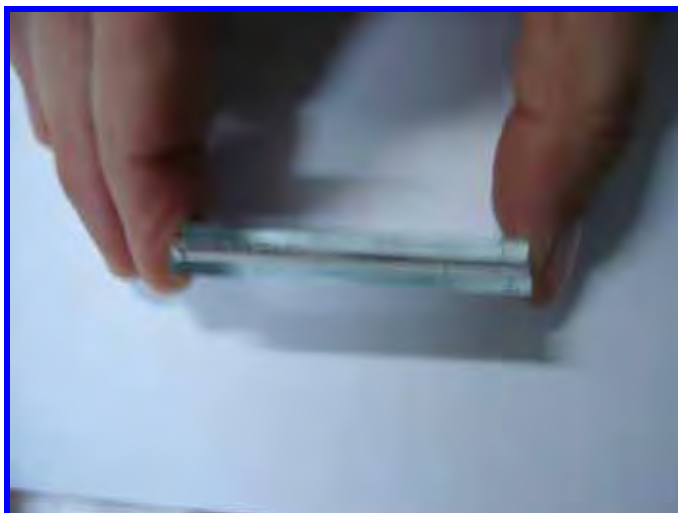


Figura 4.2 - Sanduíche formado por vidro, matriz de alumínio, vidro.

O compósito existente entre as lâminas e a matriz foi então fotopolimerizado, seguindo o tempo recomendado pelos respectivos fabricantes, vinte segundos.

As amostras foram separadas em grupos, onde para cada um dos grupos se obteve dez amostras. Para cada grupo a polimerização foi realizada com os três diferentes aparelhos fotopolimerizados, sendo dois deles de lâmpada halógena e o terceiro com lâmpadas de LED, conforme tabela 4.3.

Depois de realizada a polimerização, as amostras foram identificadas. Estes corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de: espectrometria, porosidade, dureza, microabrasão, e análise da superfície desgastada por microscopia eletrônica de varredura.

4.6 ENSAIOS REALIZADOS

(a) Ensaio de Espectroscopia infravermelho com transformações de Fourier

Foi usado um espectrômetro (FTIR - BOMEM) (Figura 4.3) do laboratório de química da UFSCar. O aparelho foi ajustado para leitura em número de onda

na região de 4000 a 500 cm^{-1} com 32 varreduras e as intensidades das bandas expressas em transmitância (%), acoplado a um computador.



Figura 4.3 – Espectrofotômetro (FTIR – BOMEM)

Os corpos-de-prova confeccionados com os compósitos para a realização dos ensaios no FTIR e seguiram os seguintes procedimentos.

Compósitos sem fotopolimerização

O compósito sem fotopolimerizar foi colocado sobre a pastilha de NaCl na quantidade de 1,5mg e gotas de 1ml de solução de clorofórmio (CHCl_3) são adicionadas na pastilha. Espera-se a evaporação total do solvente para em seguida ser analisado no espectrômetro, conforme mostra figura 4.4.

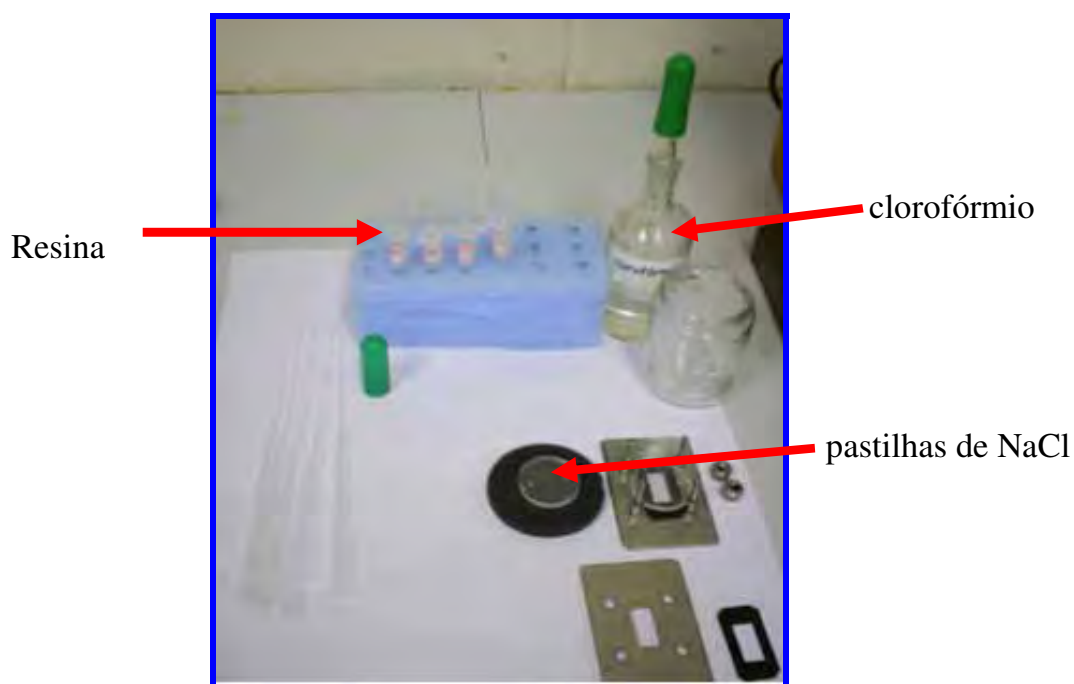


Figura 4.4 – Resina composta, clorofórmio, pastilhas de NaCl.

Compósitos fotopolimerizados

O compósito fotopolimerizado foi transformado em pó para ser examinada no FTIR. Faz-se a mistura do pó juntamente com KBr, Figura 4.5. Depois esta mistura foi pesada em balança analítica para depois ser colocada em um cadinho, Figura 4.6. A mistura é prensada em moldes especiais, sob pressão de 10.000 – 15.000 psi, até formar um disco, figuras 4.7, 4.8 e 4.9, para em seguida ser analisado no espectrômetro, conforme mostra figura 4.10.



Figura 4.5 – Mistura do pó da resina fotopolimerizada, com KBr.



Figura 4.6 – Pesagem do pó da resina fotopolimerizada, em balança analítica.



Figura 4.7 – Colocação da Mistura em molde especial.



Figura 4.8 – Colocação do molde especial na prensa.



Figura 4.9 – Obtenção da pastilha ou disco.



Figura 4.10 – Colocação da pastilha ou disco no espectrômetro.

(b) Obtenção dos Valores de Grau de Conversão dos Compósitos

Após a obtenção dos picos de transmitância, o percentual de duplas ligações carbônicas não convertidas (%C=C) foi determinado pela taxa de intensidade de absorção entre ligações C=C em 1637 cm^{-1} (pico alifático) e ligações C=C em 1610 cm^{-1} (pico aromático), antes e após a polimerização. O grau de conversão (GC) correspondente foi calculado pela subtração desta taxa de 100%.

$$(\%C = C) = \frac{\frac{trns(1637\text{cm}^{-1})}{trns(1637\text{cm}^{-1})} \bigg/ \frac{trns(1610\text{cm}^{-1})}{trns(1610\text{cm}^{-1})} \frac{polímero}{monômero}}{\times 100}$$

$$\text{Grau de Conversão (GC)} = 100\% - (\%C = C) \quad (4.1)$$

(c) Ensaio de porosidade do compósito

Obtidos os corpos-de-prova, estes foram separados em três grupos. Para cada grupo, vinte corpos-de-prova (dez para cada compósito) para serem analisados na Unesp-Campus de Guaratinguetá, os mesmos passaram por uma limpeza no aparelho ultra som por vinte minutos. Logo após os corpos de prova foram para estufa de secagem por 24 horas e depois foram pesados obtendo-se a massa seca. Na próxima etapa foram aquecidos a uma temperatura de ebulição por 3 horas, permanecendo na mesma água por 18 horas. Foram realizadas pesagens dos corpos-de-prova, obtendo-se a pesagem da massa úmida (M_u), e posteriormente a pesagem da massa imersa (M_i).

Obteve-se uma média dos três últimos valores realizados, resultando na Porosidade aparente ($P.ap.$) As alterações de massa após o teste foram obtidas entre as massas úmidas (M_U) e as massas secas (M_S).

$$\text{Porosidade aparente: } P.ap = (M_u - M_s)/(M_u - M_i) \times 100 \quad (\%) \quad (4.2)$$

(d) Ensaio de medição da microdureza Vickers dos compósitos

É um método de classificação de dureza de materiais, baseada num ensaio laboratorial.

É usada uma pirâmide de diamante com ângulo de diedro de 136° que é comprimida, com uma força arbitrária F , contra a superfície do material. Calcula-se a área d da superfície impressa pela medição das suas diagonais.

A dureza Vickers HV é dada por:

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (4.3)$$

A conversão das escalas de dureza nem sempre é precisa e recomendada, tendo em vista a sua não linearidade.

Os testes de microdureza foram feitos no microdurômetro LAICA, do laboratório de transformações de fases da USP – campus de São Carlos, utilizando um penetrador de diamante do tipo Vickers de forma quadrada e de base piramidal, utilizando uma carga estática de 10 gf (grama força), a qual foi aplicada por 15 segundos, foram realizadas dez impressões uma para cada corpo-de-prova, num total de dez. Os valores apresentados no visor do equipamento para cada impressão, foram anotados e tabulados.

(d) Ensaio de Desgaste

Um teste de microabrasão foi executado no laboratório de desgaste na UNESP- Campus de Guaratinguetá, para determinar o desgaste abrasivo dos

materiais escolhidos. O ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, consiste em uma esfera em rotação girando com movimento preciso no veio de dois eixos rotacionados. A esfera é mantida em contato permanente com a superfície horizontal de uma amostra estacionária. Um peso é aplicado para garantir uma carga normal, na presença de uma solução abrasiva de água destilada com partículas muito finas de $0,3\mu\text{m}$ de óxido de alumínio, sendo usado 20% em peso de óxido de alumínio e 80% de água destilada. Durante estes testes, a solução abrasiva é continuamente gotejada por gravidade para zona de contato. Para garantir a homogeneidade da mistura ao longo do ensaio é necessário usar um dispositivo de agitação.

A velocidade dos eixos pode ser mudada por meio de um inversor de frequência que alimenta o motor elétrico. O ensaio micro abrasão por esfera rotativa é representada na Figura 4.11. As esferas utilizadas são de aço ASTM 52100 com 15 mm de diâmetro. Uma nova esfera era usada para cada bateria de teste, fazendo um total de 10 corpos de provas por bateria. A carga aplicada no contato foi de 0.5N e a velocidade de rotação da esfera de 50 rpm. Cada ensaio realizado utilizou o tempo de um minuto.

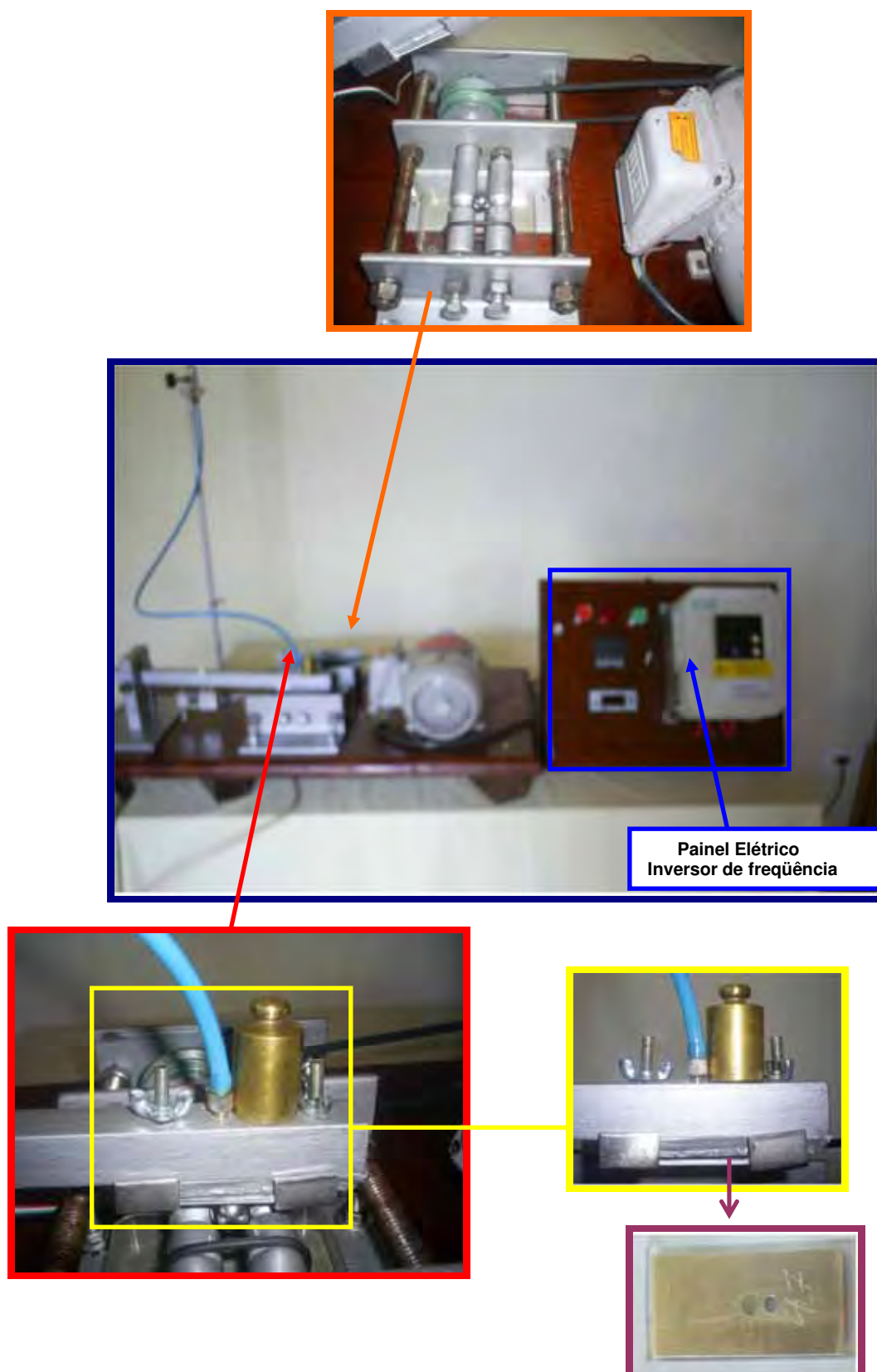


Figura 4.11 – Máquina de microabrasão por esfera rotativa.

As medições dos diâmetros das marcas de desgaste, obtidas nos ensaios, foi observada a direção de rotação da esfera. Para determinar as taxas de desgaste ou coeficiente de desgaste K_s usa-se a equação:

$$K_s = \frac{V}{S \times N} \quad (4.4)$$

Onde:

S é a distancia do escorregamento (m);

N é Carga ou força normal aplicada (N);

V é o volume desgastado (m^3), que pode ser calculado pela equação:

$$V = \frac{\pi \times b^4}{64 \times R} \quad (4.5)$$

Onde:

b é o diâmetro da superfície da cratera;

R é o raio da esfera.

Para obtenção do coeficiente de desgaste utilizou-se a (equação nº 4.4 e 4.5). As imagens das crateras que foram impressas nas amostras de compósitos foram obtidas por meio de um microscópio óptico, marca Olympus, que se encontra no laboratório de materiais da UTFPR - Campus de Cornélio Procopio. As crateras são de formato esférico. As fotos obtidas das crateras foram transmitidas por meio de uma placa de aquisição de dados para o computador onde foram armazenadas. Utilizou-se o ImajeJ para a medição dos valores do diâmetro “b” de cada cratera, a partir destas medidas foi calculado o volume, V, de material removido, obtendo-se o coeficiente de desgaste K_s de cada amostra.

Na Figura 4.12 é possível visualizar a cratera impressa em uma das amostras de compósito.

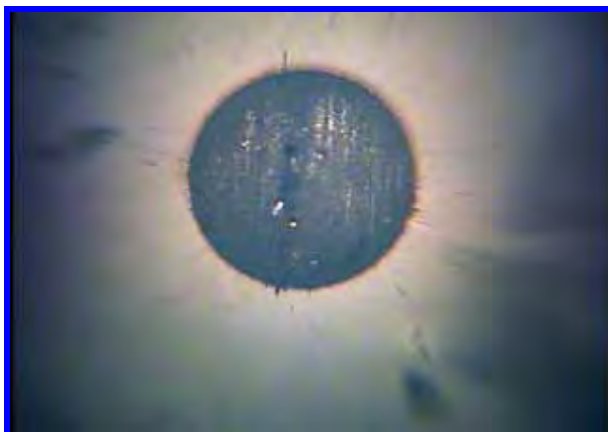


Figura 4.12- Cratera formada no ensaio de microabrasão. Imagem obtida através do aumento de 80x , no microscópio óptico.

Através da figura 4.12, mediu-se o diâmetro da esfera, onde foi obtido o valor de b , com o auxílio do ImageJ, como mostra figuras 4.13.

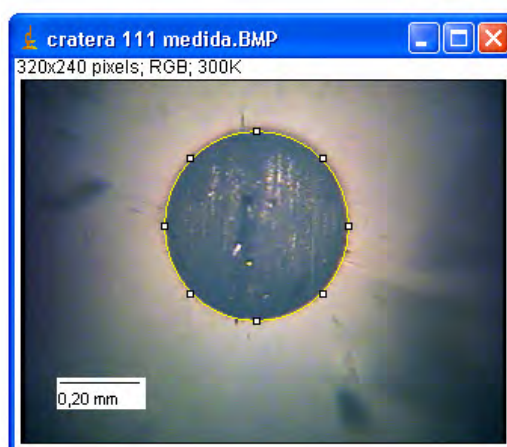


Figura 4.13 – Obtenção do diâmetro da esfera.

A figura 4.14, representa a superfície desgastada e a calota obtida no ImageJ da figura 4.13.

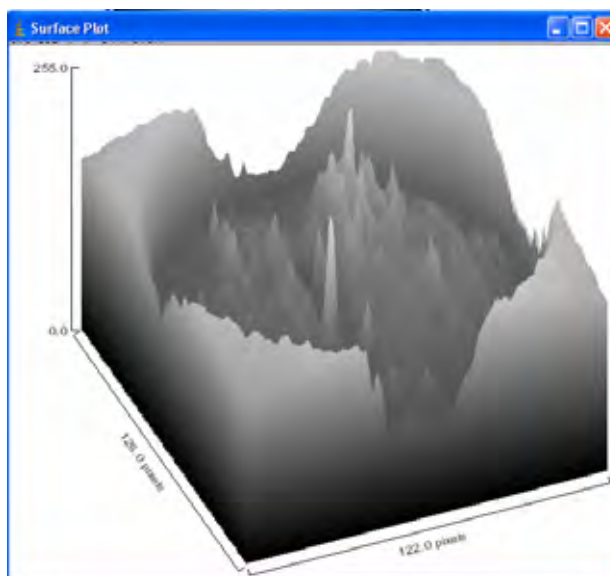


Figura 4.14 – Superfície formada após o ensaio de microabrasão, mostrando a superfície desgastada e a calota obtida no ImageJ, referente a figura 4.13.

Com os valores de diâmetros utilizou-se as equações nº 4.4 e 4.5 para calcular o coeficiente de desgaste.

4.7 Análise Estatística dos Resultados Experimentais

Para a análise entre os três aparelhos fotopolimerizadores e os dois compósitos estudados, foi utilizada o Teste de Tukey, para comparações entre cada grupo. Em ambos os testes foram utilizados nível de significância de 5%, com $p < 0,05$.

4.8 Análise da Superfície Desgastada

Através do Microscópio Eletrônico de Varredura, Marca Leo 1415 SD foram realizadas fotomicrografias com magnitudes de 2.500x, 3.000x e 4.000x., para a análise da morfologia das superfícies desgastada das amostras. Os corpos

de prova foram fixados em uma placa e metalizados com partículas de pó de ouro. Estes ensaios foram realizados na Faculdade de Engenharia de Matérias-EEL – USP/ Campus de Lorena- SP.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão mostrados e discutidos os resultados obtidos na caracterização dos compósitos, utilizando-se os ensaios de espectrometria, porosidade, microdureza, ensaio de desgaste e a análise da superfície desgastada. A influência das características da composição do compósito, grau de conversão, porosidade e dureza sobre a resistência ao desgaste serão analisados, em função dos tipos de luz (halógena ou LED) e densidade de potência dos aparelhos fotopolimerizadores.

A análise da superfície desgastada por microscopia eletrônica de varredura evidência os mecanismos de desgaste atuantes que influenciam a resistência ao desgaste do compósito.

5.1.1 Características químicas dos compósitos

Através dos ensaios de espectrometria e MEV/EDS (Espectroscopia por Dispersão de Energia), obtiveram-se as características dos compósitos I e II, sendo possível verificar sua composição química. No ensaio de espectrometria analisou-se a parte orgânica do compósito, e no ensaio de EDS a parte inorgânica.

5.1.2 Análise da parte orgânica dos compósitos

Nestes ensaios utilizaram-se amostras dos compósitos I e II, sem a fotopolimerização e com a fotopolimerização com os aparelhos AH, BH e CL.

Na figura 5.1 é representado o espectro de infravermelho do compósito I sem a fotopolimerização.

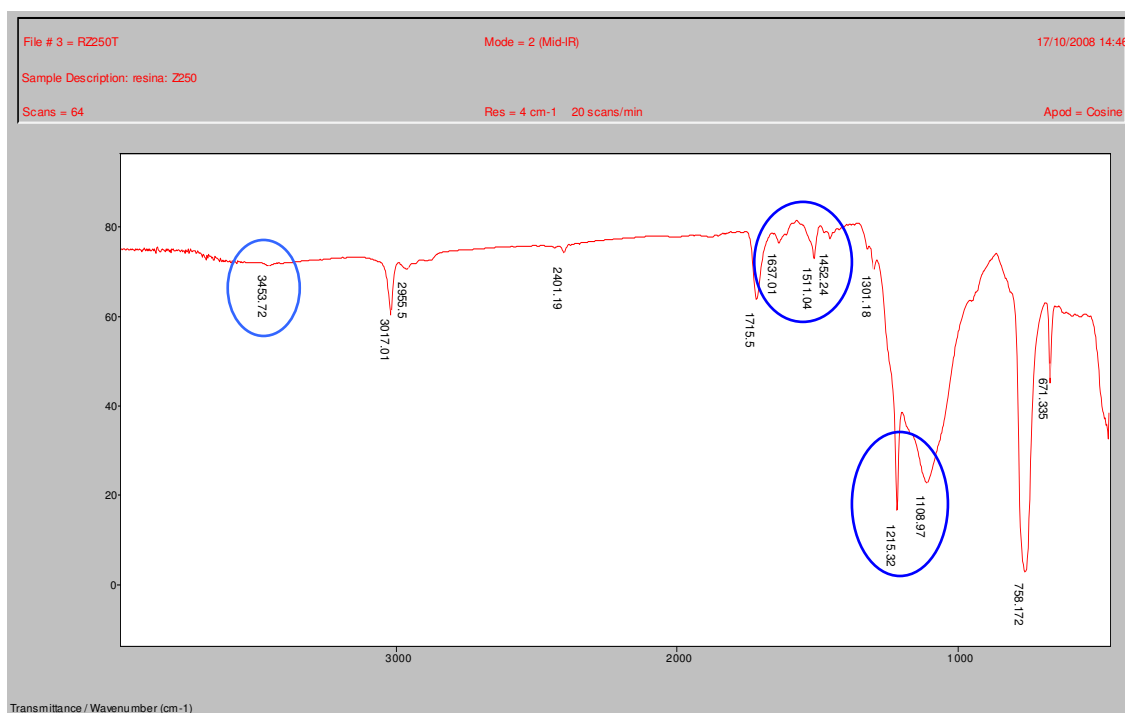


Figura 5.1- Espectro de infravermelho do compósito I sem a fotopolimerização.

A Figura 5.1 mostra os espectros de infravermelho do sistema $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$, observando-se uma banda larga em 3453 cm^{-1} correspondente a estiramentos de grupos OH de citratos e de moléculas de água presentes no sistema. A presença de H_2O foi confirmada pela absorção em aproximadamente 1637 cm^{-1} , correspondente à deformação H-O-H. A absorção em aproximadamente 1215 cm^{-1} corresponde à deformação C-H do grupo Si-CH_3 presente na rede de sílica.

As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 mostram os espectros de infravermelho do compósito I fotopolimerizado com os aparelhos A, B e C, respectivamente.

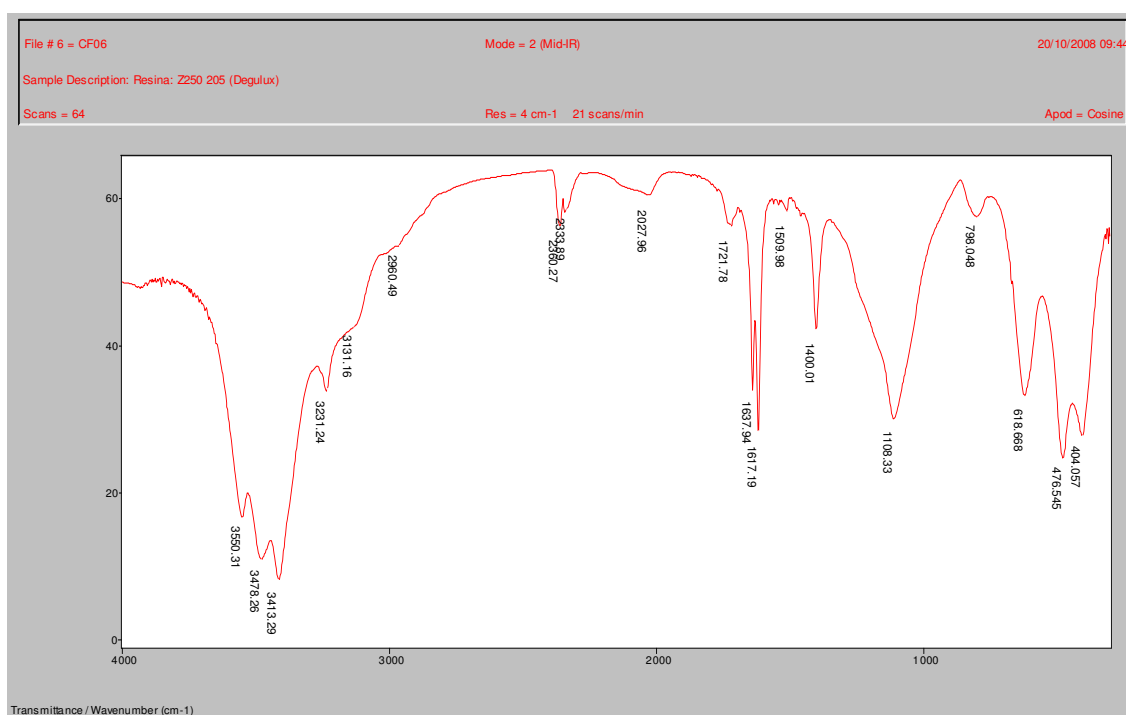


Figura 5.2 - Espectro de infravermelho do compósito I fotopolimerizado com o aparelho AH (lâmpada halógena e 452 mW/cm²).

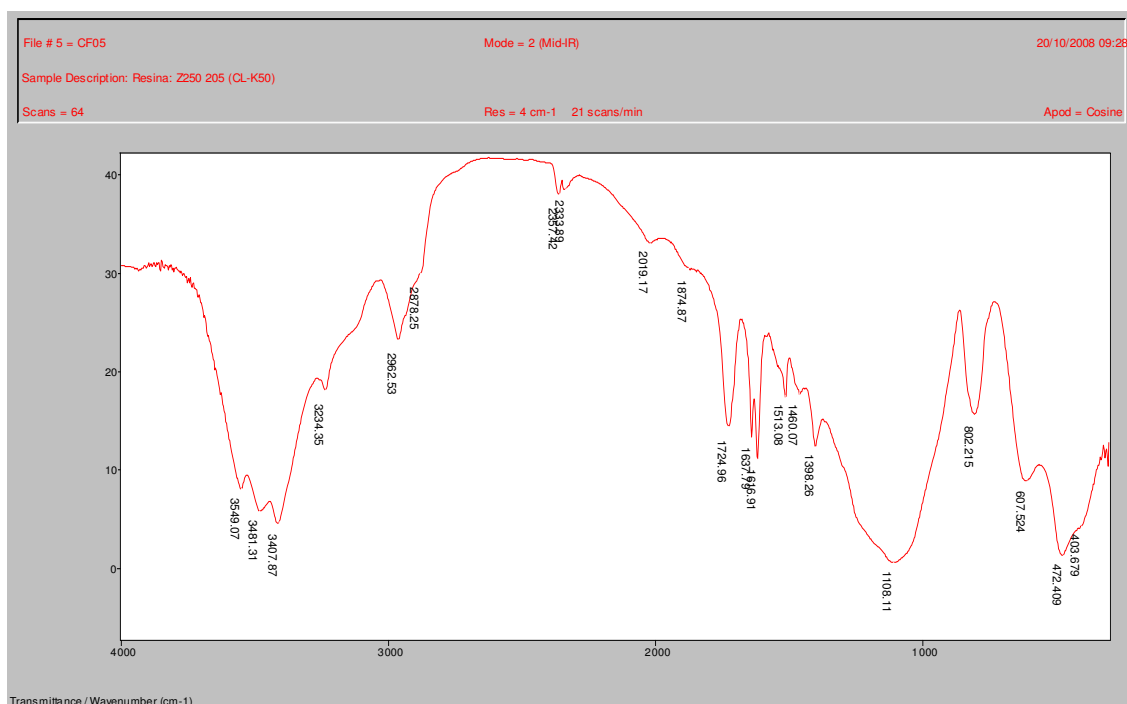


Figura 5.3 - Espectro de infravermelho do compósito I fotopolimerizado com o aparelho BH (lâmpada halógena e 700 mW/cm²).

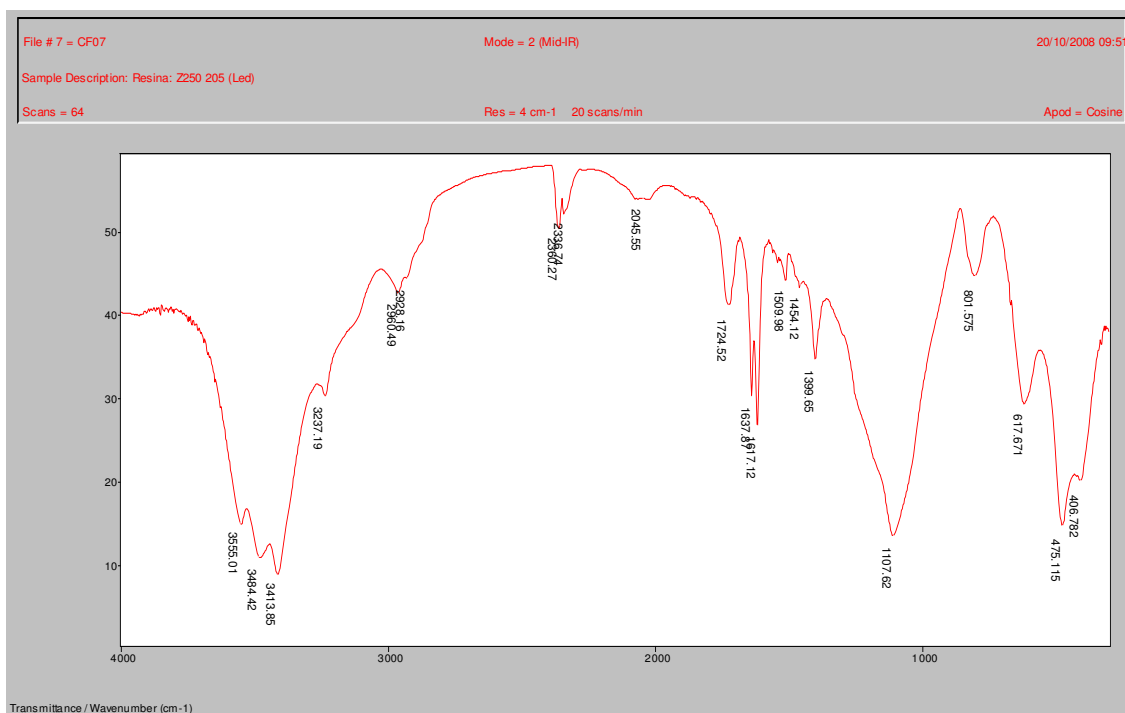


Figura 5.4 - Espectro de infravermelho do compósito I fotopolimerizado com o aparelho CL (LED e 680 mW/cm²).

Os modelos vibracionais principais foram identificados nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4. O CH que deriva da banda de estiramento do Metil de 2960 cm⁻¹ a 2962 cm⁻¹, o C=O que vem da faixa de 1716 cm⁻¹, o Metacrilato C=C que estira da faixa às 1638 cm⁻¹, o C=C que estira do grupo aromático às 1609 e 1452 cm⁻¹ (vibração do núcleo benzeno). Entre outros grupos, os que apresentam maior interesse são as ligações duplas entre átomos de carbono C=C que apresentam bandas na região de 1630 cm⁻¹, pois a presença destes sinais no espectro de FTIR indicam monômeros não reagidos na amostra, o que significa que a polimerização não foi completa (SGARBI, 2006).

A Figura 5.5 mostra o espectro de infravermelho do compósito II sem a fotopolimerização.

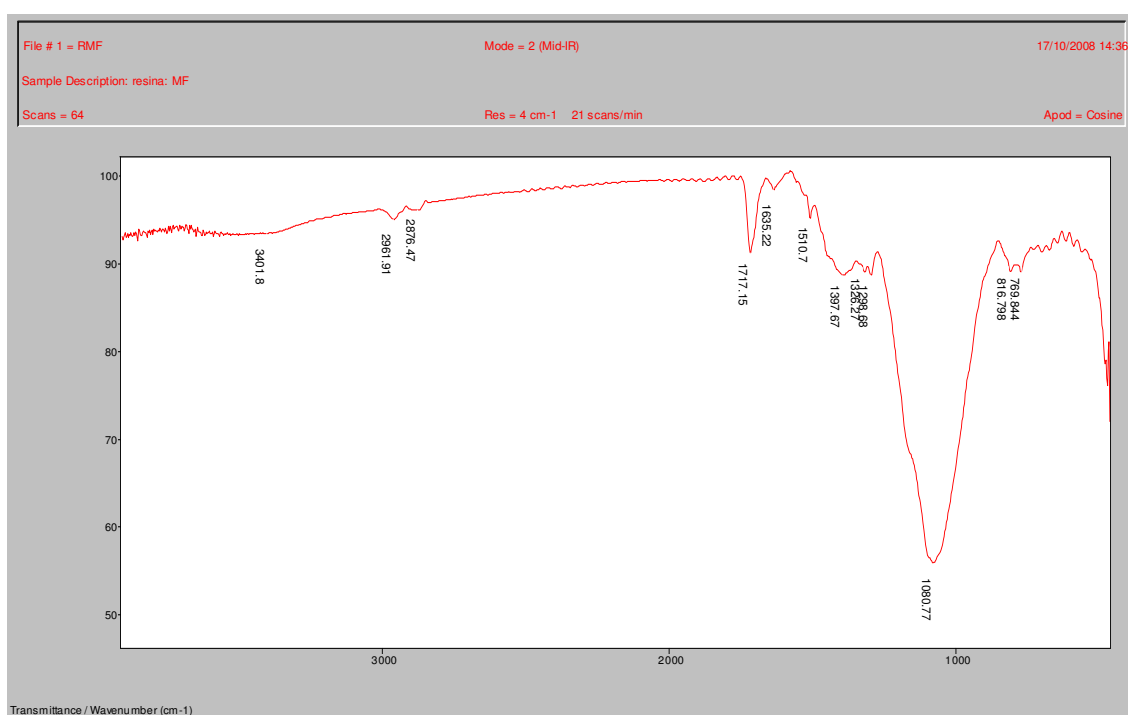


Figura 5.5 - Espectro de infravermelho do compósito II sem ser fotopolimerizado.

Na Figura 5.5, observam-se os espectros de infravermelho do compósito II antes da fotopolimerização. Há uma banda larga centrada em 3401.8 cm^{-1} , correspondente às deformações axiais dos grupos OH da água. Vê-se que antes da fotoativação do compósito, nos valores correspondentes às faixas de 1608 e 1640 cm^{-1} , são apresentados picos pequenos, mostrando a fase monômero do composto.

As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8, mostram os espectros de infravermelho do compósito II fotopolimerizado com os aparelhos AH, BH e CL, respectivamente.

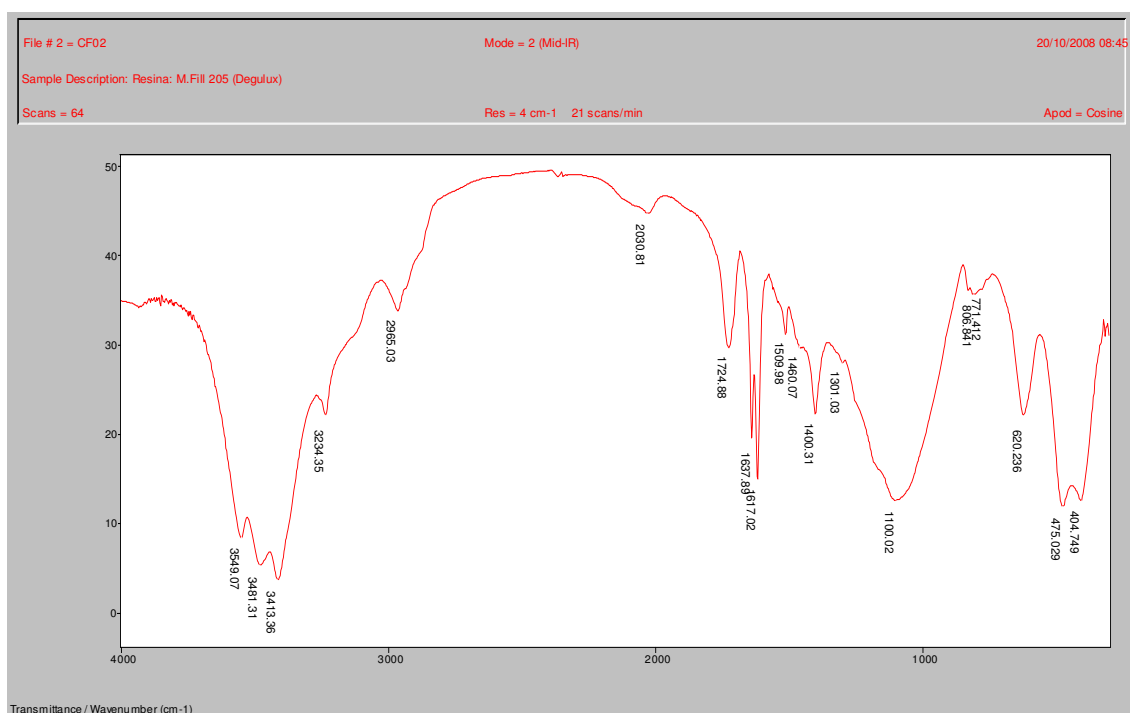


Figura 5.6 - Espectro de infravermelho do compósito II fotopolimerizado com o aparelho AH (lâmpada halógena e 452 mW/cm²).

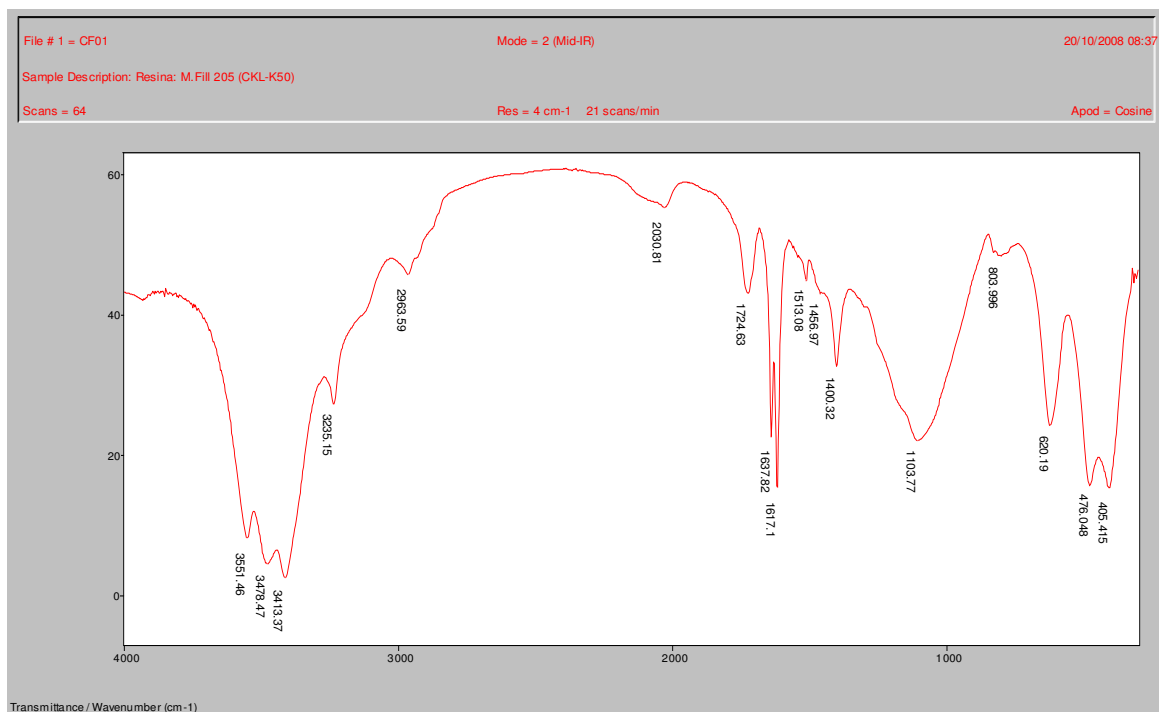


Figura 5.7 - Espectro de infravermelho do compósito II fotopolimerizado com o aparelho BH (lâmpada halógena e 700 mW/cm²).

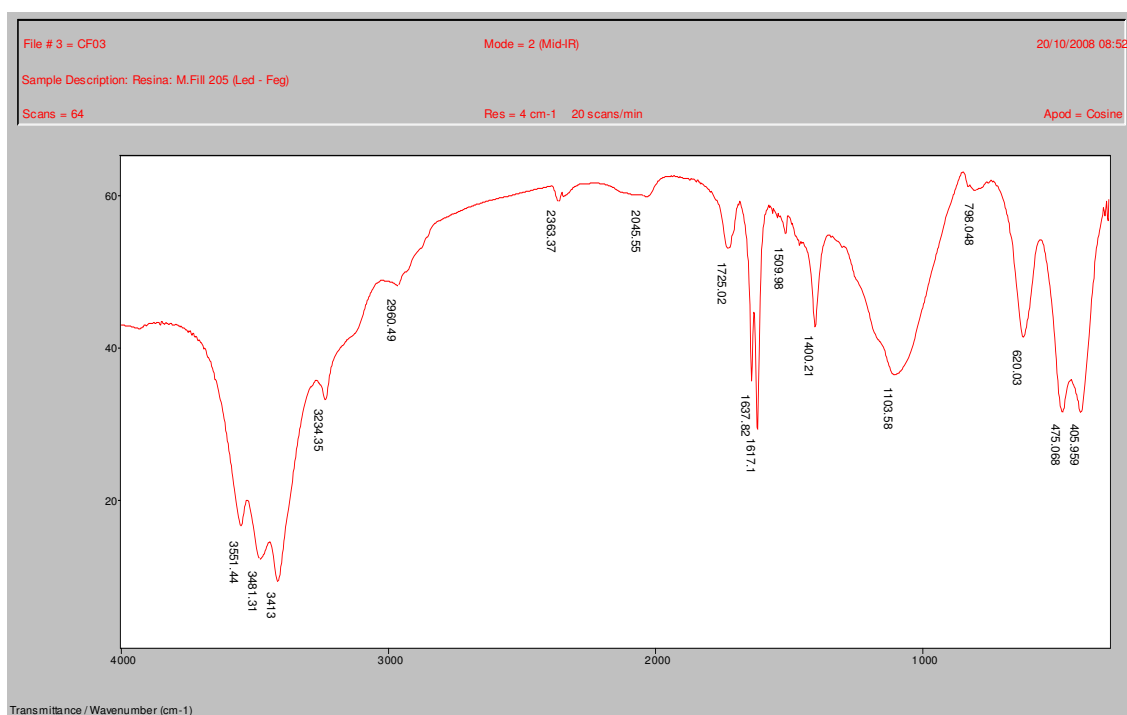


Figura 5.8 - Espectro de infravermelho do compósito II fotopolimerizado com o aparelho CL (LED e 680 mW/cm²).

A banda em 1724 cm⁻¹, correspondente às deformações axiais C=O dos grupos carbonila proveniente dos grupos metacrilato, variou de 1724.88 a 1724.52 cm⁻¹, para os três aparelhos fotopolimerizadores. Para a banda em 1637 cm⁻¹, correspondem às deformações axiais C=C dos monômeros metacrilatos residuais. Nesta banda os aparelhos fotopolimerizados A e C apresentaram praticamente os mesmos valores 1637,88 e 1637,87 cm⁻¹, respectivamente. Bandas em 1617 cm⁻¹ e 1513 cm⁻¹ são deformações axiais das ligações C-C aromáticas. A banda em 1509 cm⁻¹ corresponde às deformações axiais das ligações C-C aromáticas, provenientes do Bis-GMA.

Verifica-se, uma flutuação de quantidade de cada grupo funcional nas diferentes fotopolimerizações ocorridas com os diferentes aparelhos fotopolimerizadores, quando comparados nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8, sem que essa flutuação tenha uma relação linear de formação ou consumo destes grupos funcionais com relação à fotopolimerização realizada pelos três tipos de aparelhos utilizados.

Utilizando-se os espectros obtidos no espectrofotômetro de cada compósito para calcular a porcentagem do grau de conversão, onde foram observadas as intensidades dos picos de absorção nas regiões de 1637 cm^{-1} (ligação dupla alifática C=C) e 1608 cm^{-1} (ligação dupla do grupo aromático C=C) do polímero, e calculado com a equação nº 4.1 descrita no capítulo 4.

Através dos espectros, observam-se os grupos funcionais presentes na composição química orgânica dos compósitos I e II. Para o compósito I, conforme descrito anteriormente nas figuras de 5.2 a 5.4, há a presença do Bis – GMA/UDMA/Bis-EMA, através das bandas de O-H, C-H, C=O, C=C, e Si-O e para o compósito II os espectros também apontam a presença dos monômeros informados pelo fabricante do compósito que são Bisfenol A(BPA), Bis-GMA, Di-Etilmetacrilato de Trimetilhexildiuretano.

5.1.3 Análise da parte inorgânica dos compósitos

Para a análise da composição química da parte inorgânica dos compósitos, realizou-se a deposição de íons ouro (metalização) sobre estas, utilizando-se de um sistema de evaporação “*sputtering*” (Sputter Coater, SCD 005- Balter). As amostras metalizadas foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura (Leo 1415 SD). Foram selecionadas duas áreas de cada amostra para a realização da leitura através da Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS). Com o ensaio de EDS, foi possível determinar a composição da parte inorgânica dos compósitos utilizados, comparando-os com aqueles fornecidos pelo fabricante.

Os valores médios de constituintes inorgânicos dos compósitos, expressos por porcentagem em peso, obtida através das microanálises espectrométricas por dispersão de energia (EDS), podem ser visualizados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 - Constituintes inorgânicos dos compósitos (% em peso).

Resinas Compostas	SiO ₂	Zr	Al ₂ O ₃	BaF ₂	K	CaO ₃	SrF ₂
Compósito I	46,37	17,05	0,00	0,00	0,00	24,21	1,89
Compósito II	28,46	0,00	2,88	16,53	2,05	15,16	0,00

SiO₂ - Dióxido de silício, Zr – Zircônio, Al₂O₃ - Óxido de alumínio, BaF₂ - Fluoreto de bário, K – Potássio, CaO₃ - Óxido de Cálcio, SrF₂ - Fluoreto de Estrôncio.

A Figura 5.9, mostra o EDS do compósito I.

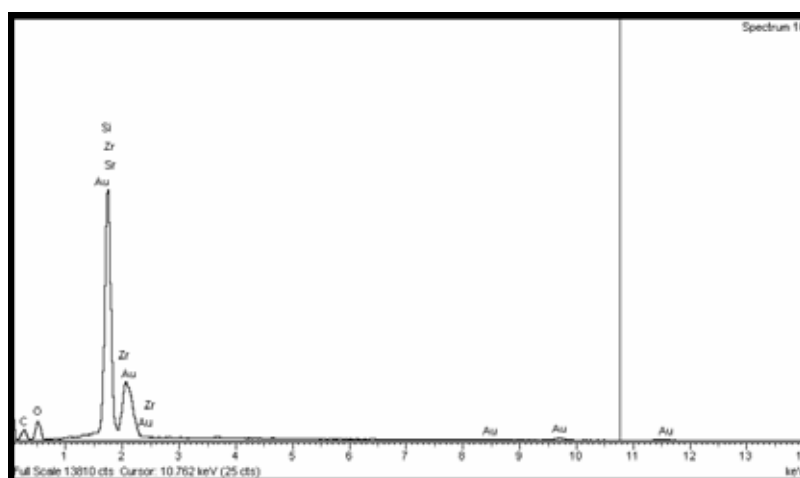


Figura 5.9 – MEV/EDS do compósito I, fotopolimerizada com o aparelho BH (lâmpada halógena, 700 mW/cm²).

Segundo o fabricante do compósito I ele é radiopaco e apresenta partículas de zircônia/sílica (77,6% em peso), sem especificar a quantidade exata de cada elemento. Nas análises foram encontradas uma porcentagem média de 17,05% de Zircônio e 46,35% SiO₂ de Dióxido de silício. Comparando estes resultados com os da Tabela 4.1, verifica-se que estes elementos fazem parte da composição deste compósito. Entretanto o componente CaO₃ - Óxido de Cálcio detectado no EDS com a porcentagem de 24,21%, não consta nos dados fornecidos pelo fabricante (Tabela 4.1).

A Figura 5.10 mostra o EDS do compósito II.

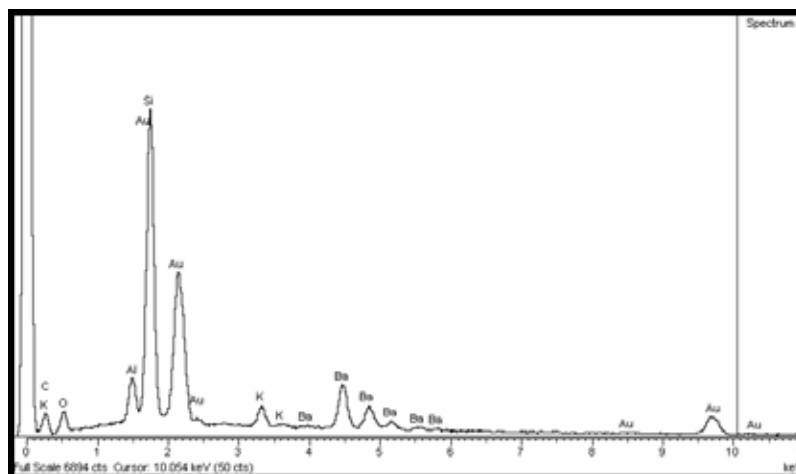


Figura 5.10 – MEV/EDS do compósito II, fotopolimerizado com o aparelho BH (lâmpada halógena, 700 mW/cm²).

Nestes ensaios verificou-se a composição química da parte inorgânica do compósito II. Foram observados na Figura 5.10 e ilustrado na Tabela 5.1 os seguintes componentes obtidos da análise EDS: o **C** - CaCO₃ (carbonato de cálcio), **Al** - Al₂O₃ (óxido de alumínio), **K** - potássio que, comparado com os elementos fornecidos pelo fabricante (Tabela 4.1), não fazem parte deste compósito; o dióxido de titânio e o óxido de ferro que aparecem na formulação do fabricante não foram observados na análise EDS; o **O** ou **Si** - SiO₂ (dióxido de silício), **Ba** - BaF₂ (Fluoreto de bário) que fazem parte da composição química do compósito fornecido pelo fabricante (Tabela 4.1) detectados no EDS, respectivamente com quantidades de 28,46% e 16,53%.

5.2 RESULTADOS DO GRAU DE CONVERSÃO DOS COMPÓSITOS

Através da equação nº 4.1, indicada no capítulo 4, foi calculado o grau de conversão dos compósitos I e II fotopolimerizados com os três aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.

Os resultados obtidos são mostrados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Grau de conversão dos compósitos I e II, desvio padrão e respectiva análise estatística .

GRAU DE CONVERSÃO			
GC (%)			
Compósito I	Média	Desvio Padrão	Análise Estatística
AH (452 mW/cm ²)	75,23	0,0182	a
BH (700 mW/cm ²)	75,07	0,0142	b
CL (680 mW/cm ²)	74,48	0,0296	c
Compósito II			
AH (452 mW/cm ²)	73,36	0,0125	c
BH (700 mW/cm ²)	73,58	0,0120	b
CL (680 mW/cm ²)	74,11	0,0126	a

n= 10 corpos de prova por material

p< 0,05

Letras minúsculas idênticas indicam ausência de diferenças estatisticamente significantes entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo Teste de Tukey.

A Figura 5.11, mostra o comportamento do compósito I em relação ao grau de conversão com os aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.

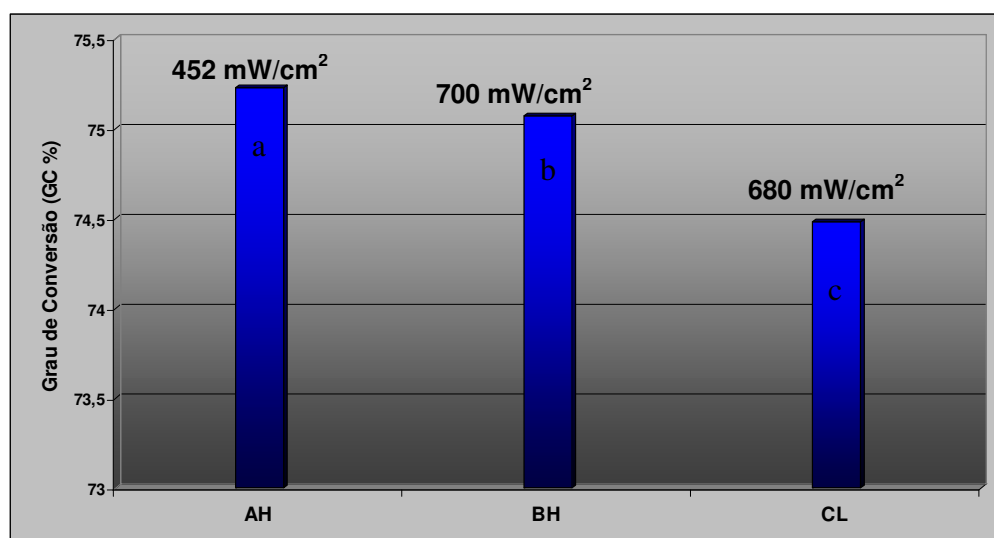


Figura 5.11 – Grau de conversão do compósito I, fotopolimerizado com as diferentes densidades de potência dos aparelhos AH, BH e CL.

O grau de conversão do compósito I com o aparelho fotopolimerizador AH, que contém lâmpada halógena e densidade de potência de 452 mW/cm^2 , foi o que apresentou a melhor conversão de monômero em polímero (75,23%). Os valores apresentados de GC na Figura 5.11, referentes ao compósito I apresentaram diferenças estatísticas para os três aparelhos analisados, porém valores médios muito próximos, como podem ser visto na Tabela 5.2.

A Figura 5.12 mostra o comportamento do compósito II em relação ao grau de conversão com os aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.

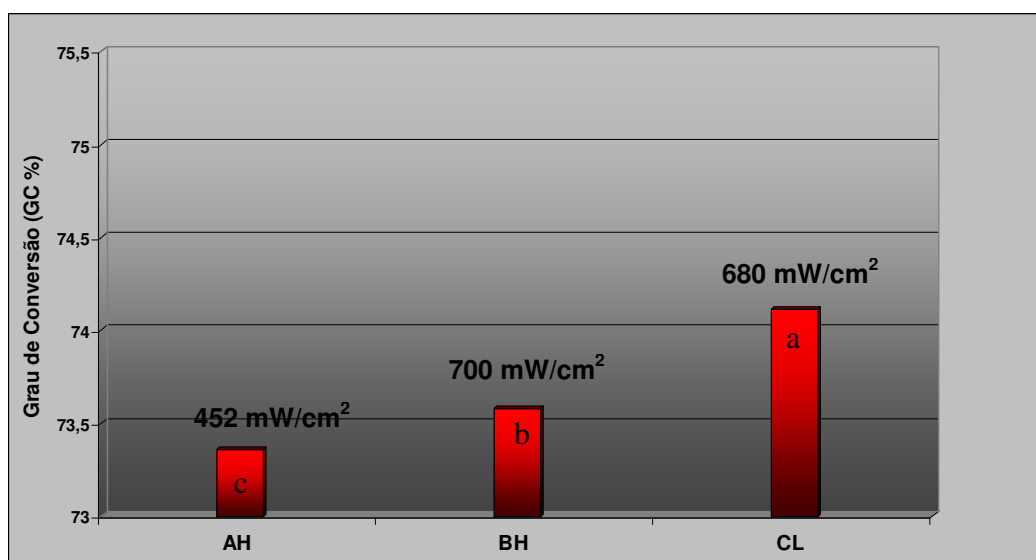


Figura 5.12 – Grau de conversão do compósito II, fotopolimerizada com as diferentes densidades de potência dos aparelhos AH, BH e CL.

Os valores apresentados de GC na figura 5.12, referentes ao compósito II, também são estatisticamente diferentes na polimerização para os três aparelhos analisados, como pode ser visto na Tabela 5.2. Para o compósito II, o melhor GC foi obtido com a utilização do aparelho C (lâmpada LED) (74,11%).

Tabela 5.2A - Média do grau de conversão aparente dos compósitos I e II e análise estatística entre os respectivos compósitos em relação a cada densidade de potência dos aparelhos fotopolimerizadores.

Grau de Conversão [%]			
	Compósito I	Compósito II	Análise Estatística
AH (452 mW/cm ²)	75,23	73,36	ab
BH (700 mW/cm ²)	75,07	73,58	ab
CL (680 mW/cm ²)	74,48	74,11	aa

n= 10 corpos de prova por material

p< 0,05

Letras minúsculas idênticas indicam ausência de diferenças estatisticamente significantes entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo Teste de Tukey.

Na Figura 5.13, comparou-se o grau de conversão (GC) resultante dos compósitos I e II, quando fotopolimerizadas pelos três aparelhos fotoativadores, AH, BH e CL.

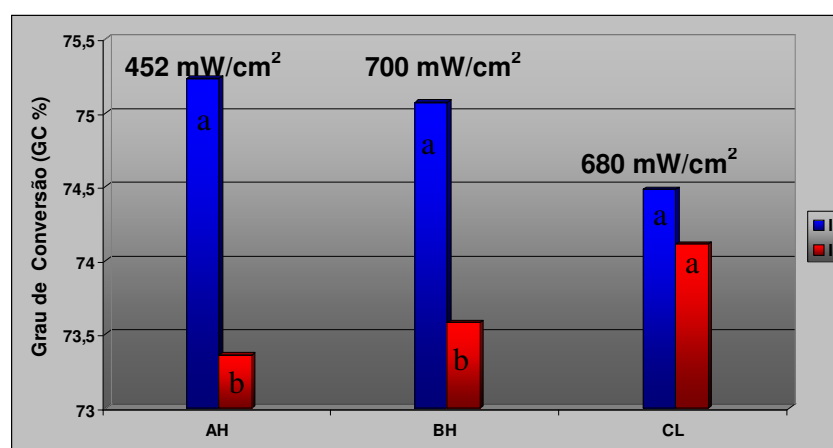


Figura 5.13 – Grau de conversão dos compósitos I e II, fotopolimerizadas com as diferentes densidades de potência dos aparelhos AH, BH e CL.

O grau de conversão (GC) dos compósitos I e II, fotopolimerizados com os aparelhos AH e BH, mostrados na Figura 5.13, apresentaram grau de conversão (GC) estatisticamente diferente. O mesmo não ocorreu com estes compósitos quando fotopolimerizados com o aparelho C (LED). Esse aparelho mostrou uma melhor homogeneidade dos resultados para o grau de conversão em relação aos dois compósitos. Apesar dos valores obtidos com o GC para os

compósitos, em relação aos aparelhos AH e BH serem diferentes estatisticamente, os resultados dos valores médios são muito próximos.

De modo geral, foram obtidos bons resultados de GC, onde os valores médios ficaram na faixa dos 73%.

O GC reflete a eficácia da polimerização, sendo que os compósitos fotopolimerizados dependem da eficácia do aparelho fotopolimerizador utilizado, da estrutura dos monômeros e capacidade dos metacrilatos se difundirem através da matriz polimérica e reagir com os radicais terminais das cadeias, tipo e quantidade de partículas de carga, uma vez que a dispersão de luz nos compósitos ocorre devido às partículas e a distância da fonte de luz (VEMHOVEN, et al., 1993).

5.3 RESULTADOS DE MEDIDA DE POROSIDADE

Os resultados dos valores de massa e porosidade aparente são mostrados na Tabela 5.3, para o compósito I, e na Tabela 5.4 para o compósito II.

Tabela 5.3 - Valores de porosidade aparente para o compósito I.

CDP	Massa (g)			P _{ap} (%)
	m _i	m _U	m _S	
AH I	2,222	3,644	3,615	2,04
BH I	2,302	3,747	3,732	1,04
CH I	2,306	3,761	3,750	0,76

Tabela 5.4 – Valores de porosidade aparente para o compósito II.

CDP	Massa (g)			P _{ap} (%)
	m _i	m _U	m _S	
AH II	2,196	3,582	3,570	0,87
BH II	2,358	3,830	3,815	1,02
CL II	2,296	3,744	3,735	0,62

m_i= massa imersa; m_U= massa úmida; m_S= massa seca; P_{ap}= porosidade aparente

A Tabela 5.5 apresenta as médias dos valores de porosidade aparente, desvio padrão e respectiva análise estatística.

Tabela 5.5 – Valores médios de porosidade, desvio padrão e análise estatística para o compósito I e compósito II em função da densidade de potência dos aparelhos fotopolimerizadores.

Porosidade Aparente [%]			
Compósito I	Média	Desvio Padrão	Análise Estatística
AH(452 mW/cm ²)	2,04	1,0276E-12	a
BH (700 mW/cm ²)	1,04	1,6033E-12	b
CL(680 mW/cm ²)	0,76	1,2683E-12	c
Compósito II			
AH (452 mW/cm ²)	0,87	5,8956E-13	b
BH (700 mW/cm ²)	1,02	1,5462E-12	a
CL (680 mW/cm ²)	0,62	1,1069E-12	c

n= 10 corpos de prova por material

p< 0,05

Letras minúsculas idênticas indicam ausência de diferenças estatisticamente significantes entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo Teste de Tukey.

A Figura 5.14, apresenta graficamente o valor de porosidade aparente para o compósito I, em função da densidade de potência dos aparelhos fotopolimerizadores.

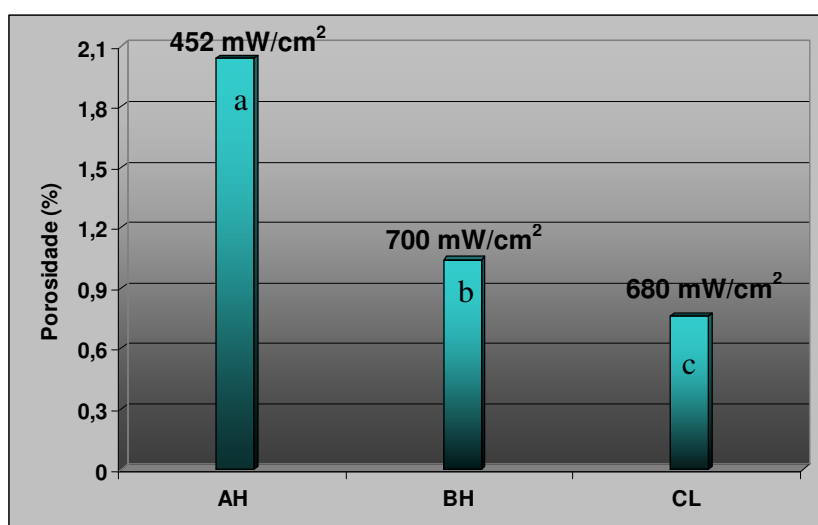


Figura 5.14- Gráfico de porosidade aparente do compósito I em relação às densidades de potência dos três aparelhos fotopolimerizadores.

Em relação à Figura 5.14, pode-se observar que as porosidades do compósito fotopolimerizado com os aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL tiveram comportamento estatístico diferentes, o resultado obtido com a utilização do aparelho CL foi (0,76 %), para o aparelho BH (1,04%), e AH (2,04%). O aparelho CL foi o que mostrou o melhor desempenho para este compósito em relação à porosidade aparente.

A Figura 5.15 apresenta o valor de porosidade aparente para o compósito II e em função da densidade de potência dos aparelhos fotoativadores.

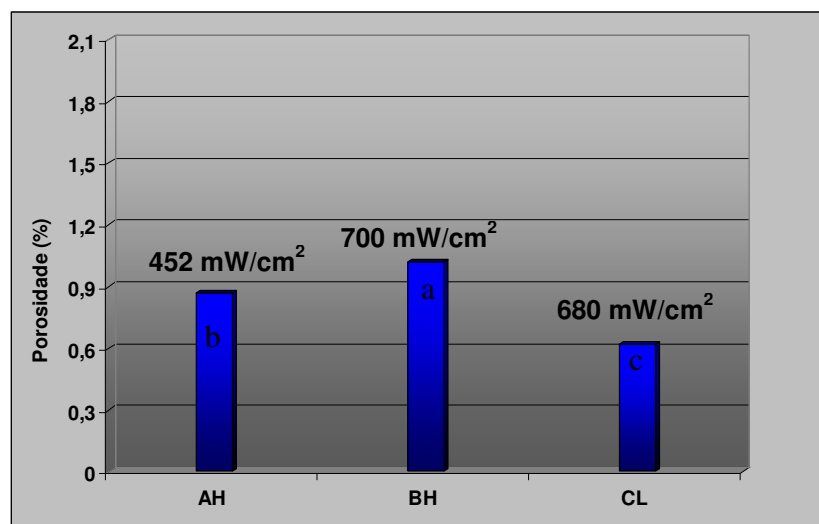


Figura 5.15- Porosidade aparente, do compósito II em relação as densidades de potência dos três aparelhos fotopolimerizadores.

Pela análise da figura 5.15, em relação à porosidade aparente (P.ap), pode-se observar que a fotoativação com os aparelhos fotopolimerizadores apresentaram valores estatisticamente diferentes para os três aparelhos utilizados, onde os valores de porosidade são: AH (0,87 %), BH (1,02 %) e CL (0,62 %). A porosidade foi maior com a utilização do aparelho BH (700mW/cm²) e a menor e melhor performance com a utilização do aparelho fotopolimerizador CL (680mW/cm²).

Tabela 5.5A - Média da porosidade aparente dos compósitos I e II e análise estatística entre os respectivos compósitos em relação a cada densidade de potência dos aparelhos fotopolimerizadores.

Porosidade [%]			
	Compósito I	Compósito II	Análise Estatística
AH (452 mW/cm ²)	2,04	0,87	ab
BH (700 mW/cm ²)	1,04	1,02	aa
CL (680 mW/cm ²)	0,76	0,62	ab

n= 10 corpos de prova por material

p< 0,05

Letras minúsculas idênticas indicam ausência de diferenças estatisticamente significantes entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo Teste de Tukey.

Na Figura 5.16 são apresentados os valores de porosidade, comparando os compósitos I e II, frente à densidade de potência de cada aparelho fotopolimerizador.

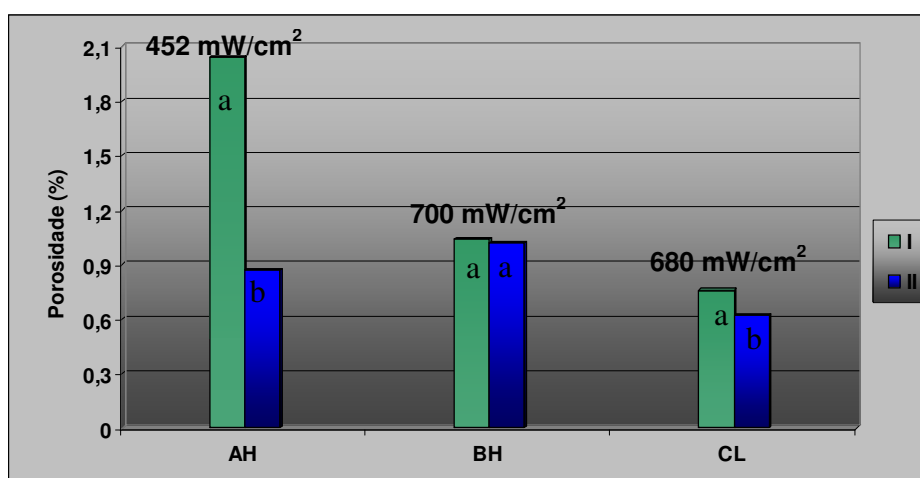


Figura 5.16- Comparação dos valores da porosidade dos compósitos I e II em relação a cada a densidade de potência de cada aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.

Analisando a Figura 5.16, os valores das porosidades dos compósitos quando fotopolimerizados com o aparelho AH, apresentaram-se estatisticamente diferentes. Os valores da porosidade para os compósitos I e II são similares quando fotopolimerizados com os aparelhos BH. O aparelho

fotopolimerizador, que proporcionou a melhor fotopolimerização, ocasionando o menores valores de porosidade, foi o aparelho CL com o compósito II (0,62%) e compósito I (0,76%).

A quantidade de poros existente em um material compósito depende da distribuição de tamanho das partículas de carga, do formato destas partículas, da metodologia de colocação do compósito na cavidade bucal, de sua textura superficial, além da fluidez da matriz e da eficácia da polimerização do compósito.

Apesar das diferenças estatísticas nos valores de porosidade apresentadas pela utilização dos aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL, observa-se que estes valores são bastante pequenos. O valor mínimo encontrado foi para o compósito II (0,62%), fotopolimerizado pelo aparelho CL, e o maior valor obtido foi 2,04% de porosidade para compósito I, utilizando o aparelho AH. O aparelho BH apresentou praticamente os mesmos resultados para os compósitos. Já o aparelho CL foi o que mostrou os melhores e menores resultados de porosidade, conforme mostra a tabela 5.5 para os compósitos I e II.

O valor da porosidade é um valor importante na resistência ao desgaste abrasivo do compósito, pois falhas na estrutura do material facilita a remoção de material pela partícula abrasiva por encontrar menor resistência durante o seu deslizamento.

5.4 RESULTADOS DE MEDIDAS DE MICRODUREZA

Neste ensaio utilizaram-se as amostras dos compósitos I e II fotopolimerizadas com os aparelhos AH, BH e CL com diferentes densidades de potência. Na Tabela 5.6 são mostrados os valores obtidos após o ensaio de microdureza Vickers.

Tabela 5.6. - Média e variância da microdureza dos compósitos I e II frente à densidade de potência de cada aparelho fotopolimerizador AH, BH e CL e análise estatística.

Microdureza Vickers [HV]			
Compósito I	Média (HV)	Desvio Padrão	Análise estatística
AH (452 m W/cm ²)	63,23	2,21	b
BH(700 m W/cm ²)	62,99	2,58	b c
CL(680 m W/cm ²)	97,10	6,06	a
Compósito II			
AH (452 m W/cm ²)	58,40	4,28	a
BH(700 m W/cm ²)	53,51	5,07	b
CL(680 m W/cm ²)	54,30	2,12	a b

n=10 corpos de prova por material

p< 0,05

Letras minúsculas idênticas indicam ausência de diferenças estatisticamente significantes entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo Teste de Tukey.

As Figuras 5.17 e 5.18 mostram o comportamento dos compósitos I e II em relação à microdureza Vickers, quanto fotopolimerizada com diferentes densidades de potência dos aparelhos AH, BH e CH.

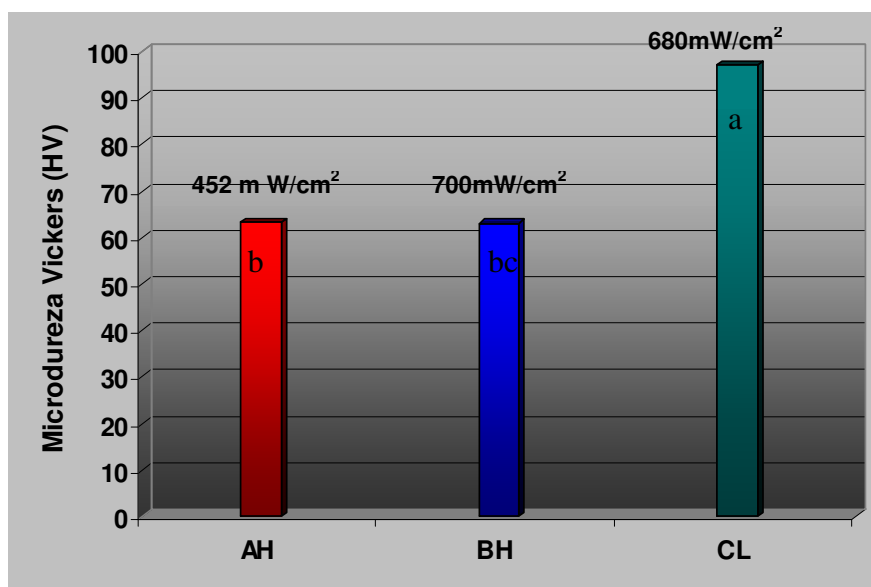


Figura 5.17 - Microdureza Vickers – compósito I fotopolimerizado com as diferentes densidades de potência dos aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.

Pela análise da Figura 5.17, pode-se observar que não há diferença estatística de microdureza produzida pela fotopolimerização com o aparelho AH e o fotopolimerizador BH. O aparelho CL (680 mW/cm^2) promoveu uma microdureza maior em relação aos outros dois aparelhos fotoativadores, AH e BH na ordem de (97,10 HV). A densidade de potência do aparelho CL (680 mW/cm^2), apesar de ter pouca diferença em relação a BH (700 mW/cm^2), proporcionou uma fotopolimerização com um valor maior de dureza, pois para este compósito o aparelho CL que contém LED influenciou no resultado final.

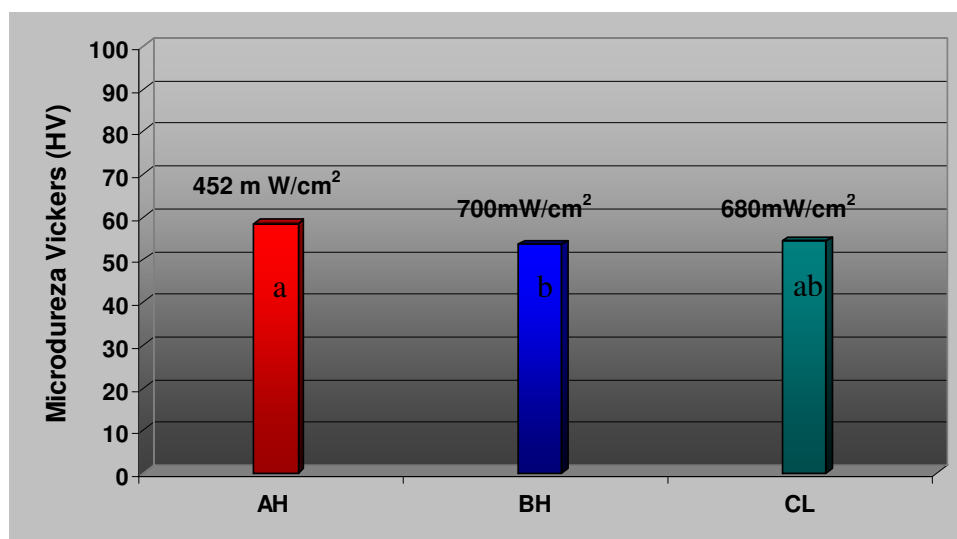


Figura 5.18 - Microdureza Vickers – compósito II fotopolimerizado com as diferentes densidades de potência dos aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.

Analisando-se a figura 5.18, observa-se que a microdureza obtida pela fotopolimerização com os aparelhos AH (452 mW/cm^2) e CH (680 mW/cm^2), tiveram comportamentos estatísticos iguais. O mesmo comportamento foi observado para os resultados de microdureza quando os compósitos foram fotoativados pelos aparelhos BH e CL. Neste compósito os tipos de lâmpadas existentes nos aparelhos utilizados na fotocura do compósito não interferiu nos resultados de microdureza.

Tabela 5.6A - Média da microdureza aparente dos compósitos I e II, análise estatística entre os respectivos compósitos em relação a cada densidade de potência dos aparelhos fotopolimerizadores.

Microdureza Vickers [HV]			
	Compósito I	Compósito II	Análise Estatística
AH (452 mW/cm ²)	2,04	0,87	ab
BH (700 mW/cm ²)	1,04	1,02	aa
CL (680 mW/cm ²)	0,76	0,62	ab

n = 10 corpos de prova por material

p < 0,05

Letras minúsculas idênticas indicam ausência de diferenças estatisticamente significantes entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo Teste de Tukey.

A figura 5.19 compara a microdureza entre os compósitos I e II, quando fotopolimerizados pelos aparelhos fotoativadores AH, BH e CL.

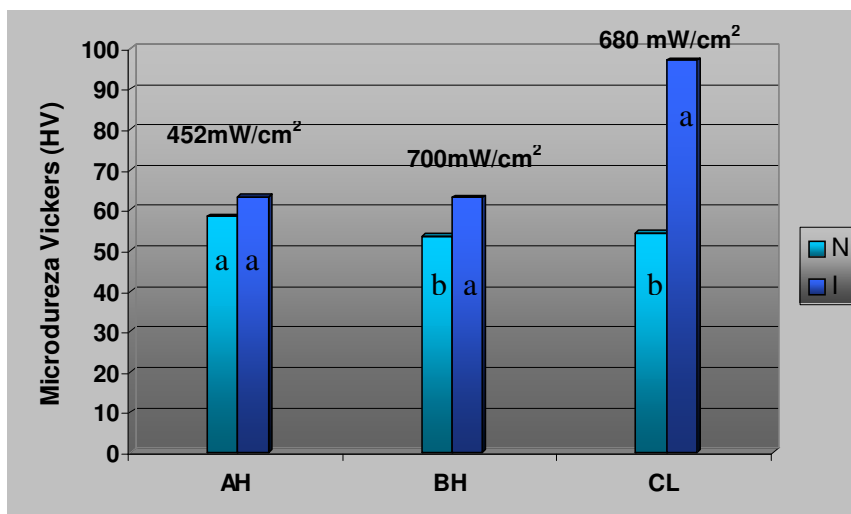


Figura 5.19 – Comparação dos valores de microdureza Vickers dos compósitos I e II, em relação a cada densidade de potência de cada aparelho AH, BH e CL.

Na figura 5.19 comparou-se as microdurezas dos compósitos I em relação ao compósito II com os aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL. Para a fotopolimerização com o aparelho BH (700 mW/cm²) e CL (680 mW/cm²), as

microdurezas dos compósitos apresentaram diferenças estatísticas. O aparelho AH (452 m W/cm^2), os compósitos I e II apresentou valores de microdurezas iguais estatisticamente.

Observa-se que os valores obtidos de microdureza do compósito II foram lineares para os três aparelhos fotopolimerizadores, onde o tipo de lâmpada que compõem estes aparelhos não influenciou nos resultados.

Para o compósito I os valores de microdureza Vickers, obtidos quando se utilizou os aparelhos AH e BH resultou em valores menores. O mesmo não ocorreu quando este compósito foi fotopolimerizado pelo aparelho CL, que apresentou o maior valor de microdureza, indicando que o tipo de lâmpada existente neste aparelho influenciou os resultados.

5.5 RESULTADOS DE MEDIDAS DE DESGASTE

Para obtenção dos valores de coeficiente de desgaste, utilizaram-se os diâmetros obtidos no ensaio de microabrasão, calculados através da equação nº 4.4 e 4.5 (capítulo 4).

A análise estatística dos dados referentes ao coeficiente de desgaste (K_s) foi feita através do teste de Tukey (5%), que agrupou os aparelhos fotopolimerizadores por desempenho semelhante, para os dois compósitos estudados, apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 Média, desvio padrão e análise estatística do coeficiente de desgaste dos compósitos I e II fotoativados com diferentes densidades de potência dos aparelhos AH, BH e CL.

Coeficiente de Desgaste [$K_s(m^3/N.m)$]			
Compósito I	Média	Desvio Padrão	Análise Estatística
AH (452 m W/cm ²)	2,16492E-11	1,0276E-12	a
BH (700 m W/cm ²)	1,94298E-11	1,6033E-12	b
CL (680 m W/cm ²)	2,06298E-11	1,2683E-12	a b
Compósito II			
AH (452 m W/cm ²)	1,88846E-11	5,8956E-13	c
BH (700 m W/cm ²)	2,29907E-11	1,5462E-12	a
CL (680 m W/cm ²)	2,07428E-11	1,1069E-12	b

*Os valores de diâmetro obtidos para este ensaio encontram-se no apêndice A.

n= 10 corpos de prova por material

p< 0,05

Letras minúsculas idênticas indicam ausência de diferenças estatisticamente significantes entre si,

A figura 5.20 mostra o comportamento do coeficiente de desgaste do compósito I, quanto fotopolimerizado com as diferentes densidades de potência dos aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.

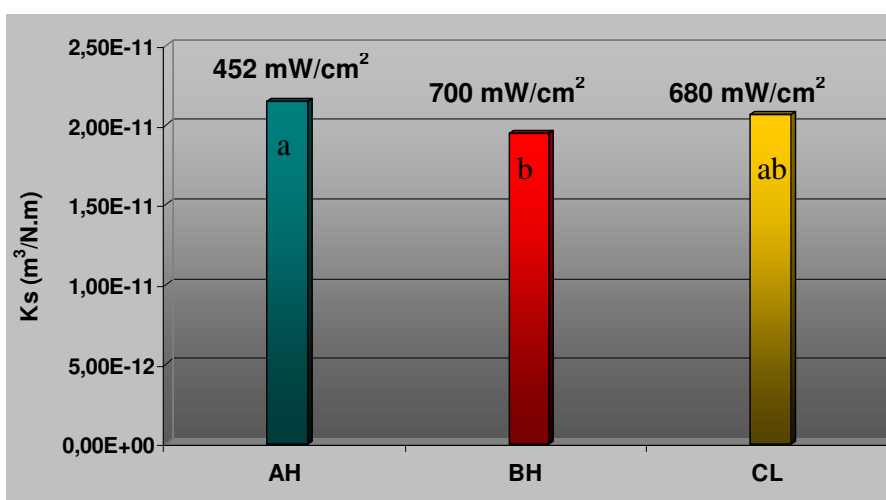


Figura 5.20 - Coeficiente de desgaste do compósito I, fotopolimerizada com as diferentes densidades de potência dos aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.

Pela análise da Figura 5.20, observa-se o coeficiente de desgaste do compósito I quando fotopolimerizado com os diferentes tipos de aparelhos fotopolimerizados AH, BH e CL. O aparelho fotopolimerizador AH, que tem densidade de potência de ($452\text{mW}/\text{cm}^2$), apresentou um coeficiente de desgaste K_s ($2,16492\text{E}-11\text{m}^3/\text{N.m}$) maior, estatisticamente, que o aparelho fotopolimerizador BH ($700\text{mW}/\text{cm}^2$), que resultou em um coeficiente de desgaste K_s de $1,94298\text{E}-11\text{ m}^3/\text{N.m}$ e valor estatisticamente igual ao aparelho fotopolimerizador CL ($680\text{mW}/\text{cm}^2$), que apresentou K_s de $2,06298\text{E}-11\text{ m}^3/\text{N.m}$. O mesmo não ocorreu com o aparelho fotopolimerizador CL em relação ao aparelho AH, que apresentou um valor de coeficiente de desgaste estatisticamente igual, podendo ser analisado na Tabela 5.7.

Há semelhança estatística entre AH e CL, porém os valores médios do coeficiente de desgaste são praticamente iguais. Independentemente do tipo de luz, da densidade de potência, os valores de desgaste, obtidos quando o compósito foi fotopolimerizado com os aparelhos fotopolimerizados AH, BH e CL, apresentam um valor médio do coeficiente de desgaste na faixa de $2,056\text{ m}^3/\text{N.m}$.

A Figura 5.21 mostra o comportamento do compósito II em relação ao coeficiente de desgaste, quanto fotopolimerizado com os aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.

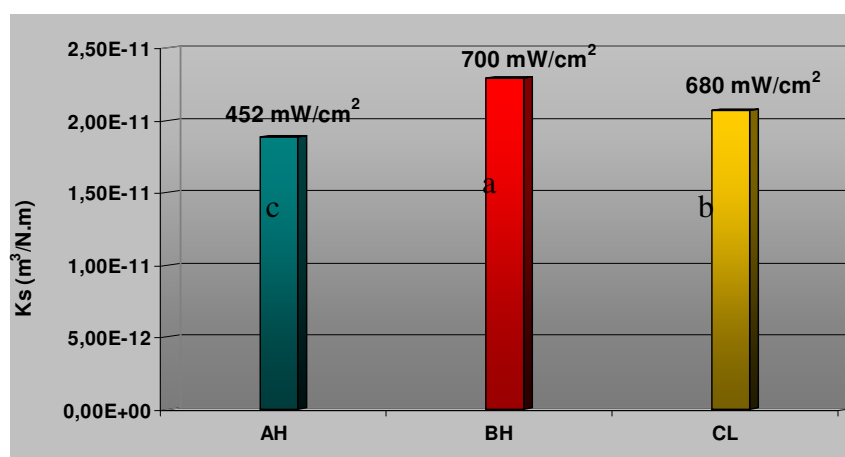


Figura 5.21 - Coeficiente de desgaste do compósito II, fotopolimerizada com as diferentes densidades de potência dos aparelhos fotopolimerizadores AH, BH e CL.

Os valores de coeficiente de desgaste apresentados na Figura 5.21, referentes ao compósito II apresentaram diferenças estatísticas para os três aparelhos analisados, como pode ser visto na Tabela 5.7. A fotopolimerização com o aparelho fotopolimerizador A (452 m W/cm²) foi a que apresentou maior resistência ao desgaste (1,88846E-11 m³/N.m).

Tabela 5.7A - Média coeficiente de desgaste dos compósitos I e II e análise estatística entre os respectivos compósitos em relação a cada densidade de potência dos aparelhos fotopolimerizadores.

<i>Coeficiente de Desgaste [Ks(m³/N.m)]</i>			
	<i>Compósito I</i>	<i>Compósito II</i>	<i>Análise Estatística</i>
A (452 mW/cm ²)	2,04	0,87	ab
B (700 mW/cm ²)	1,04	1,02	aa
C (680 mW/cm ²)	0,76	0,62	ab

n= 10 corpos de prova por material

p< 0,05

Letras minúsculas idênticas indicam ausência de diferenças estatisticamente significantes entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo Teste de Tukey.

Na figura 5.22, compara-se o desgaste resultante dos compósitos I e II, quando fotopolimerizados com as diferentes densidades de potência dos aparelhos fotoativadores.

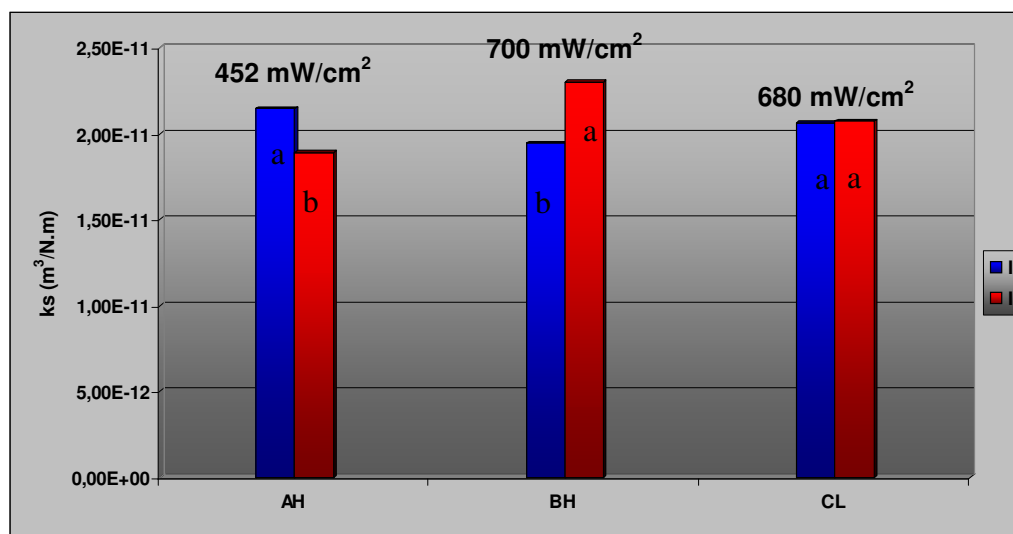


Figura 5.22 – Gráfico comparativo do comportamento de cada aparelho no resultado do coeficiente de desgaste entre os compósitos I e II.

A partir dos resultados dos coeficientes de desgaste apresentados na Figura 5.22, constata-se que o aparelho fotopolimerizador CL (700 mW/cm^2), mostrou tanto para o compósito I quanto para o compósito II, semelhança estatística. O mesmo não ocorreu com o aparelho fotopolimerizador AH (452 mW/cm^2) e BH (680 mW/cm^2) que apresentaram diferença no coeficiente de desgaste para os compósitos estudados.

A maior resistência ao desgaste entre os compósitos I e II analisados, ocorre para o compósito II fotopolimerizado pelo aparelho AH (452 mW/cm^2) e que resultou em um K_s de (1,88846E-11 $\text{m}^3/\text{N.m}$).

5.6 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DESGASTADA

Foi observada a morfologia da superfície desgastada das amostras testadas, por microscopia eletrônica de varredura (MEV), para se avaliar o mecanismo de desgaste abrasivo operante.

A figura 5.23 apresenta a superfície dos compósitos II e I antes de serem desgastadas e fotopolimerizadas como aparelho CL.

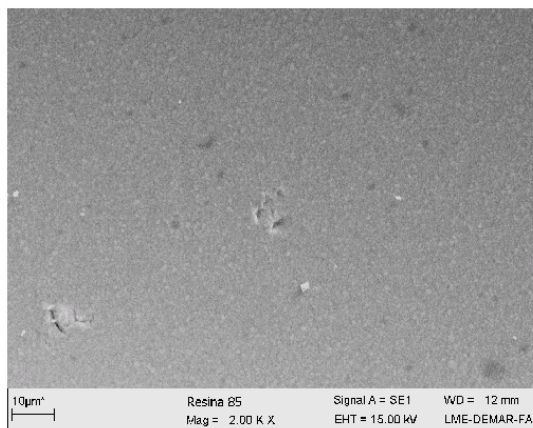


Figura 5.23 (a)- Fotomicrografia do compósito II fotopolimerizado, antes do teste de microabrasão.

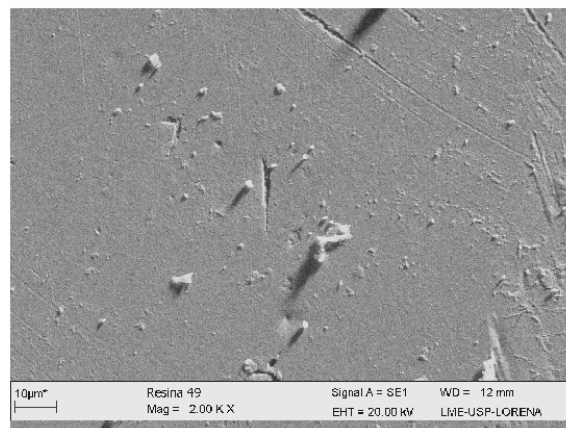


Figura 5.23 (b) - Fotomicrografia do compósito I fotopolimerizado, antes do teste de microabrasão.

As Figuras 5.23 (a) e (b) apresentam os compósitos II e I sem a realização do ensaio de microabrasão. Em ambas pode-se notar uma superfície de aspecto semelhante.

A Figura 5.24 mostra o diagrama esquemático do momento da entrada do abrasivo entre a esfera e o corpo de prova (compósito), formando as superfícies desgastadas em forma de calota.

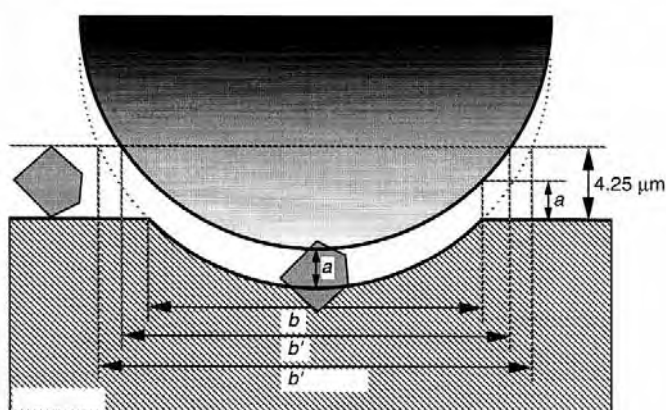
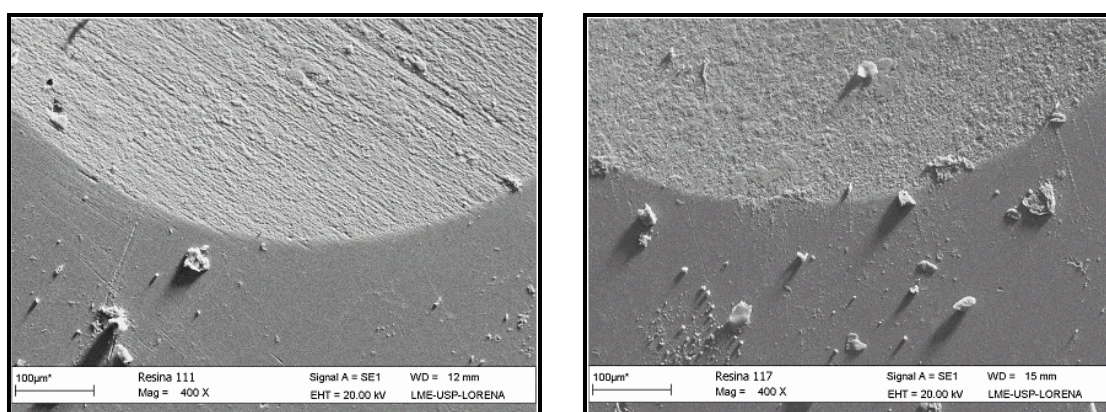


Figura 5.24 – Calota formada pela entrada de abrasivo entre esfera e corpo de prova (TREZONA,1999).

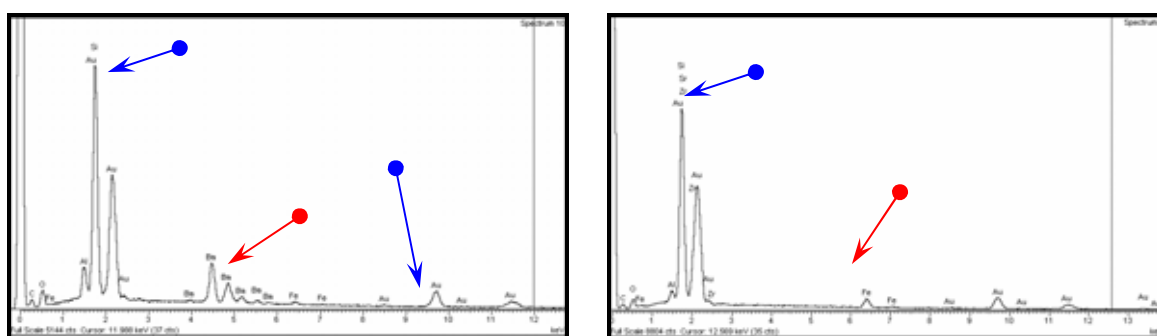
A Figura 5.25 (a) e (b) mostra as superfícies desgastadas das calotas que foram formadas pelo contato esfera/abrasivo/composto. Estas figuras referem-se aos compostos I e II, fotopolimerizados com aparelho AH, contendo lâmpada halógena com densidade de potência de 452 mW/cm^2 . A Figura 5.26 (a) e (b) mostra a composição da parte orgânica existente nos compostos, indicada através das setas, obtidas nos espectros da análise química por EDS.



(a)

(b)

Figura 5.25- (a) Fotomicrografia da superfície desgastada do composto II, (b) Fotomicrografia da superfície desgastada do composto I, fotoativados com o aparelho fotopolimerizador AH com ampliação de 400x.



(a)

(b)

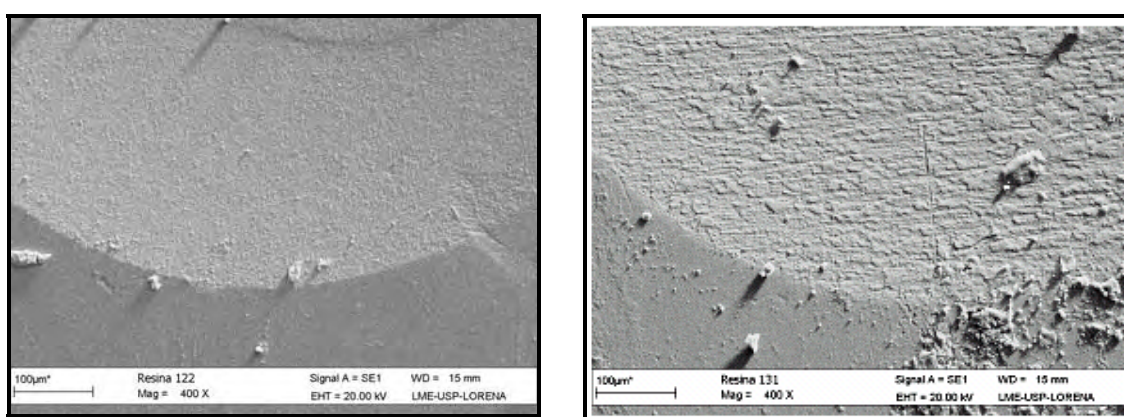
Figura 5.26 – (a) EDS do composto II, (b) EDS do composto I, realizado dentro da cratera formada no ensaio microabrasão, referente à Figura 5.24, fotopolimerizada com o aparelho AH.

A Figura 5.25 (a) apresenta a morfologia da superfície desgastada do compósito II, com borda bem definida e ranhuras contínuas e descontínuas no sentido do movimento do deslizamento, sendo algumas de dimensões mais profundas e contínuas, devido ao desgaste. Observa-se na superfície desgastada que ocorreu o deslizamento das partículas, e as partículas abrasivas engastados no contra-corpo riscam a superfície removendo o material por microabrasão.

O compósito I, Figura 5.25 (b) apresentou uma superfície desgastada, de forma homogênea, com restos de desgaste de diversas formas e tamanhos. Observa-se o deslocamento e a exposição de partículas da matriz inorgânica e cavidades superficiais, onde o abrasivo rolou sobre a superfície da matriz, levando a indentações, ocasionando a remoção do material da superfície.

Nos EDS da Figura 5.26(a), foram evidenciadas partículas de bário, óxido de silício, juntamente com o ouro que fez parte da camada de revestimento da amostra, para que esta pudesse ser analisada no MEV, conforme indicado nas setas. O mesmo pode ser observado na Figura 5.26 (b) picos de zircônia, sílica e ouro.

A Figura 5.27 (a) e (b) mostra as calotas que foram formadas. Estas Figuras referem-se aos compósitos I e II, fotopolimerizados com aparelho BH contendo lâmpad halógena.



(a)

(b)

Figura 5.27 – Fotomicrografia da superfície Desgastada do compósito II (a) e do compósito I (b), fotoativados com o aparelho BH.

Nas Figuras 5.28 (a) e (b) apresentam os resultados obtidos dos EDS dos compósitos II e I.

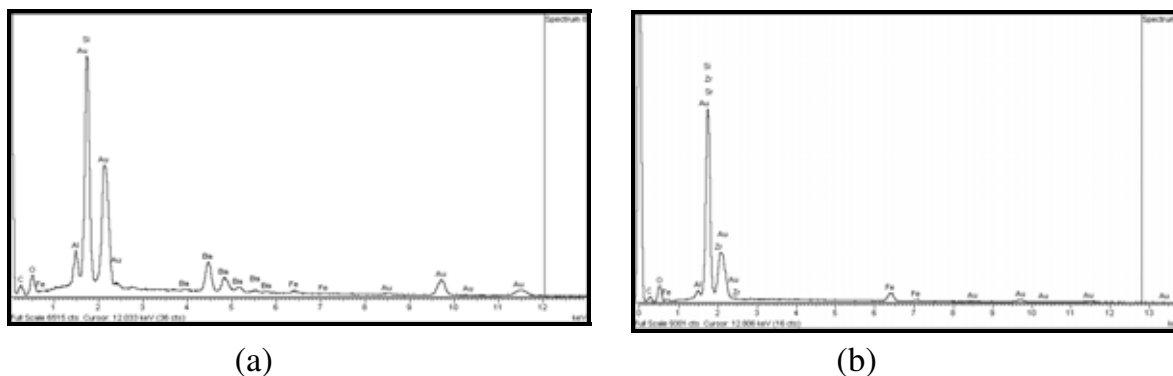


Figura 5.28 – EDS dos compósitos II (a) e I (b), realizado dentro da cratera formada no ensaio microabrasão, referente à Figura 5.27, fotopolimerizada com o aparelho BH.

Na Figura 5.27(a), observa-se borda bem definida, aspecto homogêneo. Na Figura 5.28 (a), comprova-se a existência de alumina (óxido de alumínio), utilizado como abrasivo e observa-se o elemento Bário (Ba) que compõe a parte inorgânica deste compósito. Observa-se o rolamento de partículas, produzindo indentações, de formato suave, conforme evidencia a fotomicrografia da figura 3.9 do trabalho de Trezona (1999).

Na Figura 5.27 (b), referente ao compósito I, há uma amostra mais desgastada, com maior remoção de material, ocorrendo de forma mais agressiva, caracterizada por apresentar riscos de pequenas dimensões descontínuas e cavidades de diversos tamanhos, apresentando na superfície restos de desgaste, por riscamento e por rolamento. Na Figura 5.28 (b) pode ser visto no EDS a composição química desta amostra comprovando a inclusão do abrasivo (SiO_2).

As Figuras 5.29 (a) e (b) revelam as superfícies desgastadas dos compósitos I e II, fotopolimerizados com aparelho CL.

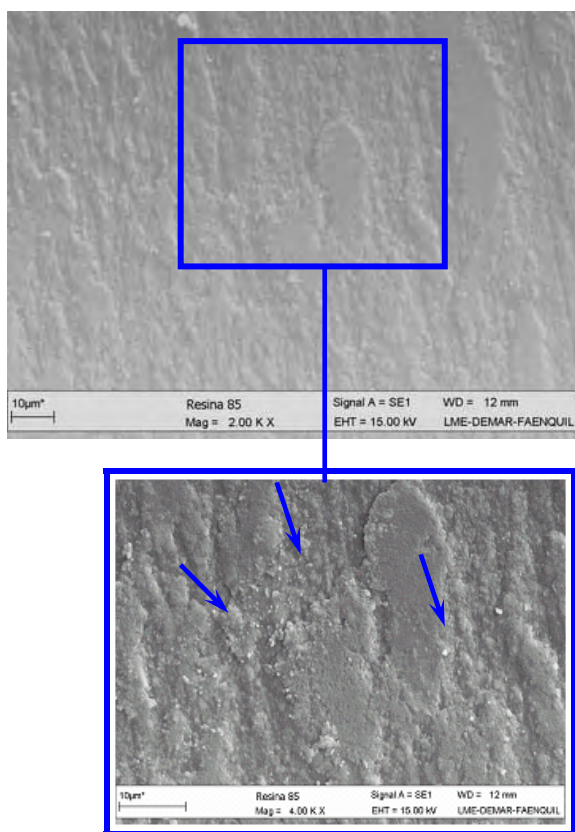


Figura 5.29 (a) – Fotomicrografia do compósito II, desgastado com ampliação de 4.00KX, e detalhe do desgaste .

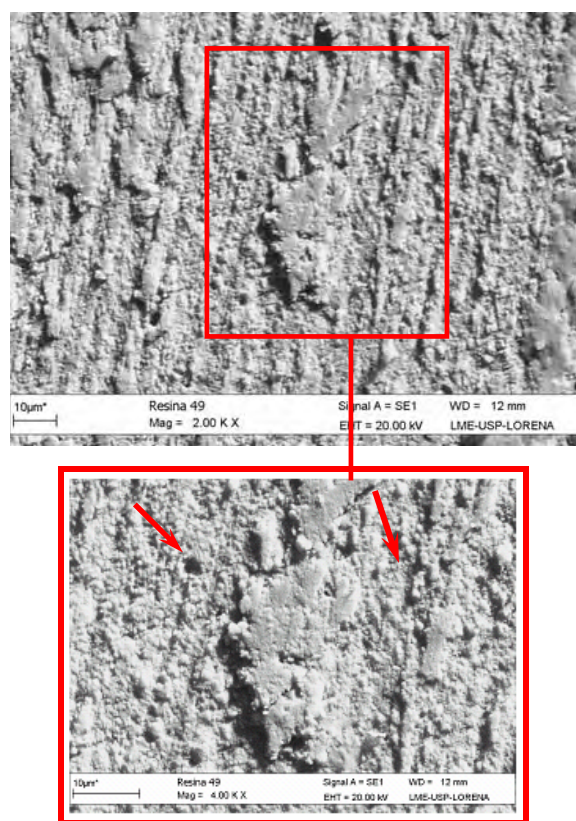


Figura 5.29 (b) – Fotomicrografia do compósito I, desgastado com ampliação de 4.00KX, e detalhe do desgaste.

Nestes compósitos, quando fotopolimerizados com o aparelho CL, durante o teste de desgaste de microabrasão, ocorre o desgaste preferencial na superfície do compósito, deixando as partículas salientes. No compósito I, da figura 5.29 (b), fica evidenciada a direção do deslizamento da esfera de ensaio sobre a superfície desgastada do material. São observados riscos profundos, assim como o deslocamento de partículas de vários tamanhos indicados nas setas. Após o deslizamento sobre a matriz, evidencia-se o desgaste por microabrasão de três corpos e a presença de deslocamento de material, apresentando um aspecto escamoso em direção do deslizamento.

Na Figura 5.29 (a) também pode ser observado o deslizamento de partículas sobre a amostra desgastada. As partículas podem ser vistas na indicação das setas.

5.7 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS, DO GRAU DE CONVERSÃO, DA POROSIDADE E DA DUREZA SOBRE A TAXA DE DESGASTE

Na análise comparativa do grau de conversão, porosidade, microdureza e coeficiente de desgaste dos compósitos I e II deverão ser observados os menores valores de porosidade e do coeficiente de desgaste e os maiores valores de dureza e grau de conversão.

A Tabela 5.8 mostra os valores de porosidade, microdureza e coeficiente de desgaste e grau de conversão de cada compósito estudado.

Tabela 5.8 – Valores de porosidade, dureza, coeficiente de desgaste e grau de conversão dos compósitos I e II.

	GC (%)	Porosidade (%)	Dureza (HV)	Ks (m/m³.N)
Compósito I				
Aparelho Fotopolimerizador	Média	Média	Média	Média
AH (452 mW/cm ²)	75,23	2,04	63,23	2,16492E-11
BH (700 mW/cm ²)	75,07	1,04	62,99	1,94298E-11
CL (680 mW/cm ²)	74,48	0,76	97,10	2,06298E-11
Compósito II				
AH (452 mW/cm ²)	73,36	0,87	58,40	1,88846E-11
BH (700 mW/cm ²)	73,58	1,02	53,51	2,29907E-11
CL (680 mW/cm ²)	74,11	0,62	54,3	2,07428E-11

Tabela 5.9 – Valores de percentual de carga inorgânica e tamanho das partículas de enchimento dos compósitos I e II.

	Percentual de carga inorgânica	Tamanho das partículas de enchimento
Compósito I	77,6 % em peso 60% em volume	0,19 -3,3 µm
Compósito II	80 % em peso 79% em volume	0,04 – 2,2 µm

Analisando o compósito I, o melhor resultado que se apresentou aconteceu quando ele foi fotopolimerizado com o aparelho CL, obtendo-se o menor valor

de porosidade (0,76%), o maior valor de microdureza (97,10 HV) e o segundo menor coeficiente de desgaste ($2,06298 \times 10^{-11} \text{ m/m}^3 \cdot \text{N}$). Esse valor de coeficiente de desgaste, pelo teste de Tukey, mostrou ser estatisticamente semelhante aos outros dois valores de desgaste.

Em relação ao compósito II, apesar dos resultados de porosidade, dureza e coeficiente de desgaste estarem dentro de uma variação muito pequena, pôde-se notar que os valores obtidos para este compósito com a fotopolimerização feita pelo aparelho AH, apresentaram porosidade (0,87%) e dureza (58,44 HV), além do menor valor para o coeficiente de desgaste e não se pôde relacionar o grau de conversão, pois para este compósito com o aparelho AH o valor obtido foi o menor valor (73,33%) de GC.

Através desta análise comparativa, observa-se que o compósito I, que contém em sua formulação a zircônia e a sílica, com partículas de tamanho que variam de 0,19 a 3,3 microns, foi o que obteve resultados mais estáveis (tabela 5.8). Ressalta-se que a efetiva fotopolimerização foi conseguida através do aparelho CL, que utiliza o diodo emissor de luz (LED). Para o compósito II, não se pode afirmar que o aparelho AH foi o que proporcionou os melhores resultados. Tal compósito utiliza em sua parte inorgânica partículas de reforço de vários componentes, com microdurezas diferentes, e com partículas de tamanhos variados (de 0,04 a 2,2 microns). Isto pode ser um fator para a não uniformidade dos resultados (Tabela 5.8).

O estudo de Turssi et al (2005), mostrou que partículas de tamanho menor são utilizadas para diminuir o espaçamento entre si e reduzir o desgaste, concluindo que o tamanho e a forma das partículas promovem melhores valores de desgaste no compósito.

Pode-se salientar que tanto para o compósito I quanto para o compósito II, os maiores valores de porosidade propiciaram um coeficiente de desgaste maior (Tabela 5.8.), pois quanto mais poros existirem na superfície de um material, quando ocorrer o desgaste esta superfície torna-se mais fragilizada, propiciando o arrancamento de partículas, incidindo em um maior desgaste.

5.8 SÍNTESE DA ANÁLISE DO MECANISMO DE DESGASTE ATUANTE NOS COMPÓSITOS QUANDO FOTOPOLIMERIZADOS COM OS APARELHOS FOTOPOLIMERIZADORES AH, BH E CL.

A análise do mecanismo de desgaste atuante, realizada anteriormente, é apresentada de maneira sintética na Tabela 5.11.

Tabela 5.10 - Síntese da análise dos mecanismos de desgaste atuantes, para o compósito I.

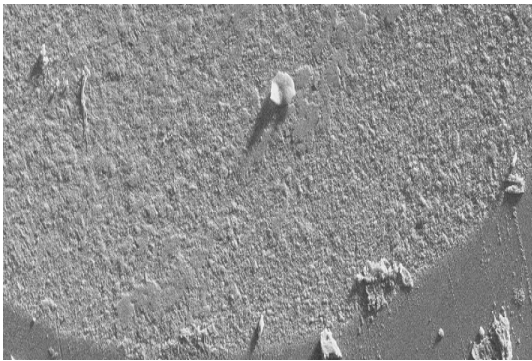
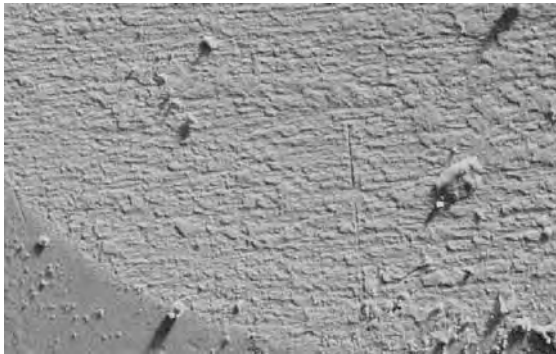
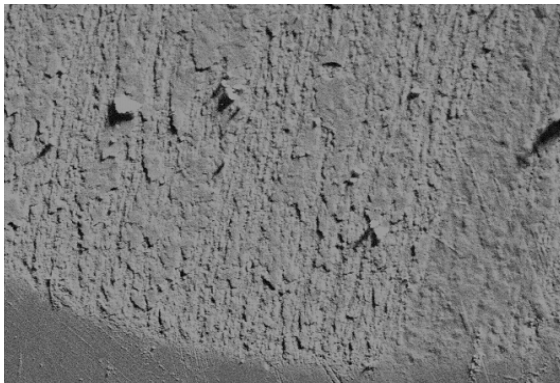
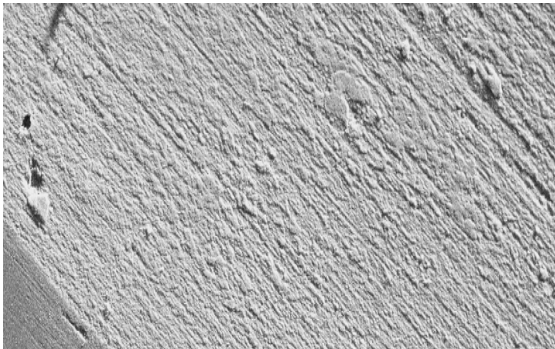
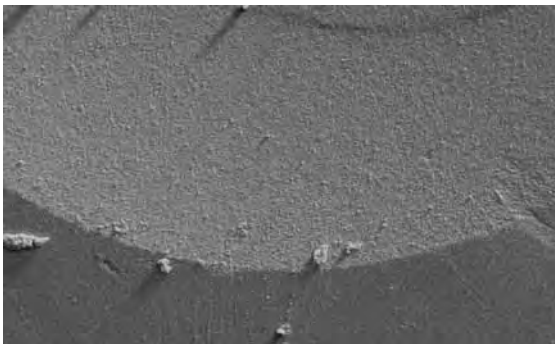
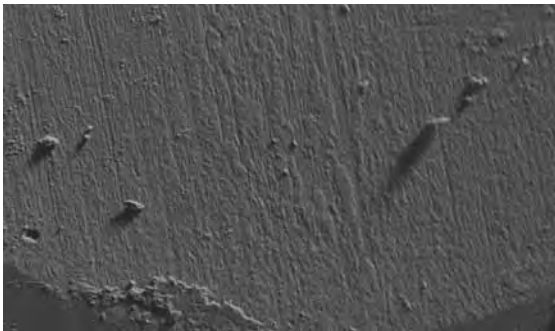
Aparelhos	Compósito I	Mecanismo de desgaste
AH		• microindentações por rolamento; • microabrasão por deslizamento.
BH		• microabrasão por deslizamento
CL		• microabrasão por deslizamento.

Tabela 5.11 - Síntese da análise dos mecanismos de desgaste atuantes, para compósito II.

Aparelhos	Compósito II	Mecanismo de desgaste
AH		• microabrasão por deslizamento.
BH		• microindentações por rolamento.
CL		• microabrasão por deslizamento.

O mecanismo de desgaste atuante é mostrado na Figura 5.30, onde ocorreu a remoção de material, e na figura 5.31 são mostradas as etapas de como ocorre o mecanismo de microabrasão por deslizamento.



Figura 5.30 – vista frontal (a) e vista superior (b) do início do arrancamento das partículas de desgaste por microabrasão.

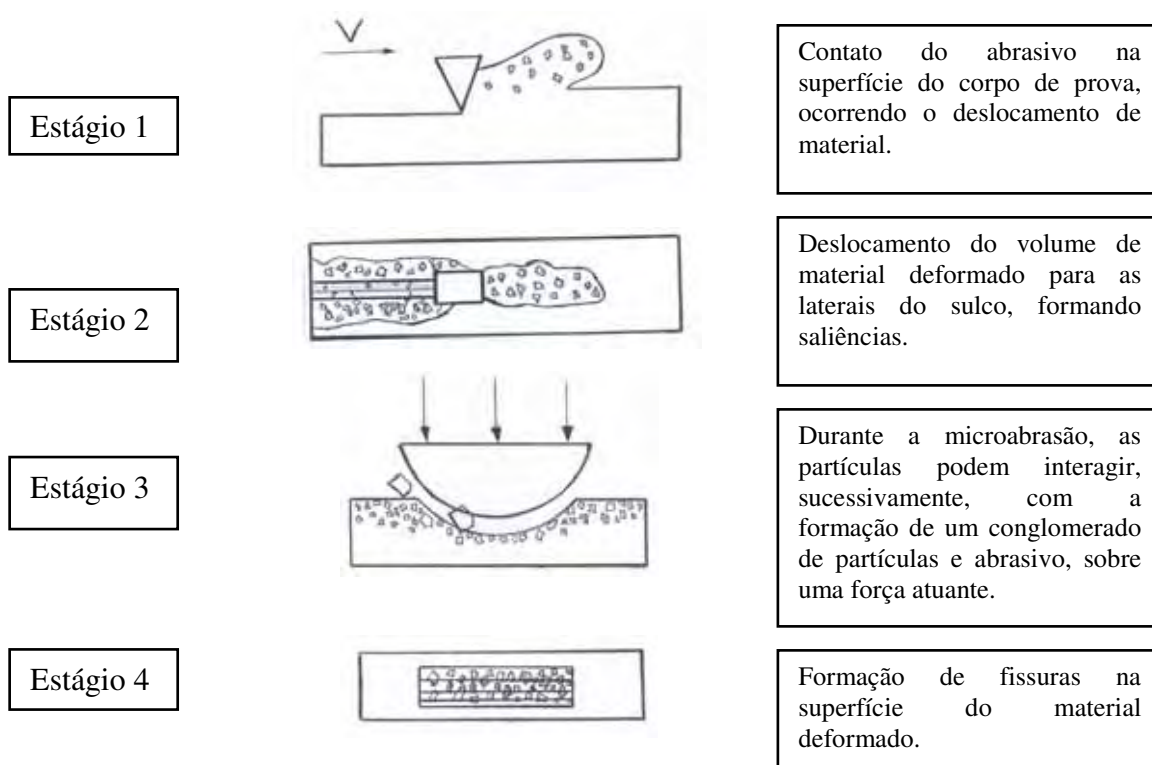


Figura 5.31 – Estágios de como ocorre o mecanismo de desgaste de microabrasão por deslizamento.

Verifica-se que o mecanismo de desgaste predominante nos compósitos é o deslizamento. Para o compósito I, ocorreu o mecanismo de rolamento (indentações), e o deslizamento, o que pôde ser verificado por riscos suaves, quando este compósito foi fotoativado pelo aparelho AH (452 mW/cm^2), ou seja, ocorreu uma transição dos mecanismos. Para esse mesmo compósito, mas quando fotopolimerizado pelos aparelhos BH (700 mW/cm^2) e CL (680 mW/cm^2), o mecanismo de desgaste atuante foi igual, ocorrendo o deslizamento, como pode ser identificado nas fotomicrografias da Tabela 5.10.

O mesmo comportamento pode ser verificado para o compósito II, mas o mecanismo de rolamento (indentações) foi observado quando este compósito foi fotopolimerizado pelo aparelho BH (700 mW/cm^2). O mecanismo de deslizamento foi também predominante para este compósito quando fotoativado pelos aparelhos AH (452 mW/cm^2) e CL (680 mW/cm^2).

Observou-se que os mecanismos de desgaste atuantes que preponderaram nos compósitos I e II foram os mesmos, entretanto no compósito I, isso ocorreu de forma mais severa e no compósito II, de forma mais suave.

Nas fotomicrografias dos compósitos, nota-se que a microdureza da carga (partículas que compõem a parte inorgânica do compósito), juntamente com o abrasivo utilizado no ensaio, foram fatores determinantes no mecanismo de desgaste atuante.

CONCLUSÕES

De acordo com as metodologias empregadas e resultados obtidos, é válido concluir:

1. Os três aparelhos fotopolimerizadores AH (452 mW/cm^2), BH (700 mW/cm^2) e (680 mW/cm^2), não influenciaram o grau de conversão dos compósitos estudados, ficando no patamar de 73%. Os valores de grau de conversão dos compósitos I e II não interferiu no coeficiente de desgaste. O Grau de conversão está diretamente relacionado a composição da parte orgânica de cada compósito.
2. A porosidade obtida dos compósitos I e II mostrou que quanto maior os valores encontrados, maiores foram os resultados obtidos do desgaste. A porosidade dos compósitos I e II apresentou resultados menores quando foi utilizado o aparelho CL (680 mW/cm^2) em sua fotopolimerização, exibindo valor de 0,76% e 0,62% respectivamente.
3. A alta quantidade volumétrica de partículas da carga existente no compósito I (60%) e no compósito II (79%) está relacionada à resistência mecânica do compósito. Não se observam grandes variações de resistência ao desgaste do compósito I, em relação ao compósito II, em virtude da alta concentração volumétrica de partículas existentes em ambos.
4. A maior resistência ao desgaste, entre os compósitos I e II analisados, ocorre com o compósito II, foi fotopolimerizado pelo aparelho AH (452 mW/cm^2), ($1,88846\text{E-}11 \text{ m}^3/\text{N.m}$).
5. Nas fotomicrografias dos compósitos estudados e fotopolimerizados com os aparelhos (452 mW/cm^2), BH (700 mW/cm^2) e (680 mW/cm^2), ficou evidenciado que o mecanismo de desgaste predominante foi o de microabrasão por deslizamento. Porém também observou-se nas fotomicrografias, o mecanismo de microindentações por rolamento no compósito I, quando este foi

fotopolimerizado pelo aparelho A (452 mW/cm^2), e para o compósito II, quando utilizado o aparelho B (700 mW/cm^2). Em ambos os compósitos, a microindentação provocou os maiores valores de coeficiente de desgaste (K_s $2,16492 \text{ E-}11 \text{ m}^3/\text{N.m}$ e $2,29907\text{E-}11 \text{ m}^3/\text{N.m}$) e de porosidade aparente (2,04% e 1,02%).

6. O mecanismo de desgaste serve de indicativo de qual será o melhor comportamento clínico do compósito em relação ao desgaste. Onde foi verificado neste trabalho que o mecanismo de desgaste por microindentações por rolamento proporcionou os maiores valores de desgaste.

7. Pode-se dizer que os três aparelhos fotopolimerizadores AH (452 mW/cm^2), BH (700 mW/cm^2) e (680 mW/cm^2), são adequados ao uso clínico, independente da lâmpada usada por eles, o que não interferiu nos resultados do desgaste.

8. O uso do aparelho com LED, é uma alternativa aos aparelhos de luz halógena. Eles são mais compactos, leves, sem fio, possuem uma maior durabilidade da lâmpada e um comprimento de onda de emissão da luz mais específico.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, P. R. et al. Estudo do desgaste abrasivo das resinas compostas disponíveis no mercado brasileiro. **Mat. Res.**, São Carlos, v. 6, n. 2, 2003.

ANUSAVICE, K. J. **Philips Materiais Dentários**. 10 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1998.

ARAÚJO, ROSEHELENE MAROTTA et al. Efeito da intensidade de luz e irradiação de calor de fotopolimerizadores em função do tempo de uso. **J. bras. Odontol. Clín**; v.1, n.6, p. 50-5, 1997.

ARCHARD, J.F.; HIRST, W. The wear of metals under unlubricated conditions; **Proceedings Royal Society of London**, 236A, p.397- 410. 1956.

ASM HandBook; Friction, Lubrification and Wear Technology.vol.18, 1995.

ASM Handbook Committee. **Mechanical Testing and Evaluation**. ASM Metals HandBook Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation, 2000.

ASTM, Standard terminology relating to erosion and wear, in Annual Book of ASTM Standards, 1994, ASTM G40-94.

BARATIERI, L. et. Al. Estética- Restaurações Adesivas Diretas em dentes Anteriores Fraturados. São Paulo: **Quintessence**, 1995.

BASSIOUNY, M.A, GRANT AA. A visible light-cured composite restorative: clinical open assessment. **Br Dent J**. 1978; v. 145, n.11, p.327-30.

BIANCHI, A. R. R. **Desgaste abrasivo (pelo ensaio do disco retificado) de 19 resinas compostas disponíveis no mercado odontológico brasileiro.** Bauru, 2003. 93p.: il.; 30cm. Tese. (Doutorado) – Faculdade de Odontologia da Bauru. U.S.P. 2003.

BLAU P. J.; BUDINSKI K. G; Development and use of ASTM standards for wear testing. **Wear** ISSN 0043-1648. International Conference on Wear of Materials N°12, Atlanta, GA, ETATS-UNIS. (25/04/1999), vol. 225-29, n° 2 (672 p.) (12 ref.), p. 1159-1170, 1999.

BRAEM, M; LAMBRECHTS P; VANHERLE G; DAVIDSON CL. **Stiffnes increase during the setting of dental composite resins.** J Dent Res 1987;66(12):1713-6.

BRISCOE, B. J., ADAMS, M. J., **Tribology in particulate technology**, IOP Publishing Ltd, 1987, p.319- 334, ISBN 0-85274-425-0.

BRU, R. J. B. W. **Avaliação mecânica de superfícies do Aço SAE 4144 /** Rodrigo José Brasil Wanda Bru - Curitiba, 2006, 66 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2006.

BUDINSKI, K. G. Resistance to particle abrasion of selected plastics. **Wear of Materials**, Proceedings of the Eleventh International Conference on Wear of Materials, Califórnia, Elsevier, (1997).

BUDINSKI, K.G.“Laboratory testing methods for solid friction”, **ASM handbook**. USA: ASM International handbook committee. v. 18, p. 45-58. 1995.

BUIJS, M. and KORPEL-VAN HOUTEN, K., A model for lapping of glass, **Journal of Materials Science**, volume 28, pp 3014 – 3020, 1993.

CATAI, Rodrigo Eduardo, et al., 2004, Joinville, Santa Catarina, Mercosul. **A influência dos mecanismos de desgaste abrasivo no processo tribológico dos materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos.** In 2^o Congresso em Ciências de Materiais, v. CD-ROM. p. 1 – 10.

CHAWLA, K. K. **Composite materials science and engineering.** 2 ed. New York: Springer-Verlag, 1998. 483 p.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction.** 5th. New York: J. Wiley, c2000. 871 p. ISBN 0-471-32013-7.

COOK, W. D. Spcetral distributions of dental photopolimerization Sources. **J Dent Res**, v.61, n.12, p. 1436-8, Dec. 1982.

COSTA, A. D. **Estudo do comportamento mecânico in vitro de dois compósitos restauradores odontológicos contendo nanopartículas.** Rio de Janeiro, 2007, 113 f. (COPPE/UFRJ, M.Sc. Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2007) dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE . 2007.

COZZA, R. C. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo.** 2006. 192 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2006.

DAHL, B.L.; CARLSSON, G.E.; EKFELDT, A. Occlusal wear of teeth and restorative materials. **Acta Odontol Scand**, Oslo, v.51, n.5, p.299-311, Oct. 1993.

DAHL, B. L. e OILO, O., In vivo wear ranking of some restorative materials, **Quintessence International**, v.25, n.8, p. 561-565, 1994.

DENIS, A. B. F. **Fotoativação de resina composta por diferentes fontes de luz e avaliação da profundidade de polimerização por diversos métodos**, São Carlos, 2007. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos. Faculdade de Engenharia de Ribeirão Preto e Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2007.

DEUIS, R. L., SUBRAMANIAN, C., YELLUP, J. M., Abrasive wear of aluminium composites – a review, **Wear**, nº 201, p.132-144, 1996.

FONSECA, I.A.A., **Obtenção de Compósitos Cerâmicos Reforçados com Carbetos Refratários a Partir de Precursores de Polímeros**, 2006, 82f. Dissertação (Mestrado em Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

FRANCO, E.B.; FREITAS, A.B.D.A.; D' ALPINO, P.H.P. Tratamento expectante prévio à restauração estética: procedimento simples, seguro e com sucesso. **Jbc: J. Bras. Clin. Estet. Odontol.**, Curitiba, n.21, p.14-19, 2000.

FRANCO, JÚNIOR, A. R. **Obtenção de Revestimentos Dúplex por Nitretação a Plasma e PVD-TiN em Aços Ferramenta AISI D2 e AISI H13**, São Paulo, 2003, 178f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. 2003.

GAHLIN, R., et al. The crater grinder method as a means for coating wear evaluation - state of the art, **Surface & Coatings Technology**. 90 (1997) 107.

GAHR, K. H. Z. Microstructure and Wear of Materials. **Tribology**. Elsevier. v.10, p 1-7, 1987.

GAHR, Z. K. H. Microstructure and wear of materials. Siegen, Federal Republic of Germany, Institute of Materials Technology. University of Siegen, 1987. v. 10.

GATES J.D. Two-body and three-body abrasion: a critical discussion. **Wear**, Amsterdam, NY. v. 214, pp.139-146, 1998.

GRIGOROUDIS K.; STEPHENSON D. J. Modelling low stress abrasive wear. **Wear**, v. 213, Issues 1-2, 30 December 1997, p. 103-111.

HAHN, S., Os papéis da ciência dos materiais e da engenharia para uma sociedade sustentável. **Estudos avançados**, 1994, v. 8, n. 20, ISSN 0103-4014.

HARSHA, A.P.; TEWARI U.S.; VENKATRAMAN, B. Three-body abrasive wear behaviour of polyaryletherketone composites, **Wear**, v. 254 p.680-692, 2003.

HEINTZE, S. D., ZELLWEGER, G., CAVALLERI, A., et al., 2006. Influence of the antagonist material on the wear of different composites using two different wear simulation methods. **Dental Materials**, v.22, n.2, pp.166-175.

HOLMBERG, K., MATTHEWS, A. Tribology of coatings. Coatings Tribology- Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering. 1^a ed, Amsterdam, **Elsevier Science B.V.** 1994.

¹HUTCHINGS I. M. **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials**. 7th. edition. London: Edward Arnold, 1992. apud

COZZA, R. C. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo**. São

Paulo, 2006. 192 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. 2006.

JESUS, E.R. B. **Obtenção, usinagem e desgaste de materiais compósitos de matriz metálica processados via metalurgia do pó.** São Paulo. 80f., 1998. Dissertação (Mestrado). Programa de Tecnologia Nuclear - IPEN/Universidade de São Paulo –USP.

JORGENSEN, K. D., ASMUSSEN E., Occlusal abrasion of a composite restorative resin with a ultra-fine filler an initial study. **Quintessence Int**, v. 9, p. 303-13. 1978.

KASSMAN, J. A, S. HEDENQVIST, P.; OLSSON, M., A new test method for the intrinsic abrasion resistance of thin coatings, **Surf. Coat. & Technol.**, 50 (1991) 75-84.

KATO, K.; Wear mode transitions; **Scripta Metall.**, v.24, , p.815-820. 1990.

KAWAGUCHI M; FUKUSHIMA T.; MIYAZAKI T. The relationship between cure depth and transmission coefficient of visible-light-activated resin composites. **J. Dent.Res.**v.73, n.2, p.516-21.1994.

KAWAKAME, M. S., **Estudo do atrito e desgaste de polímeros e materiais compósitos para uso em vedações de motores elétricos e compressores.** 2003.Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado de Santa Catarina- UDESC.

KELLY, A., **Mechanical and physical behaviour of metallic and ceramic composites.** Andersen,S.I. Ed. Riso, Denmark: Riso National Laboratories, p. 75- 88, 1988.

KILDAL, KK; RUYTER IE. How different curing methods affect mechanical properties of composites for inlays when tested in dry and wet conditions. **Eur J Oral Sci** ; v. 105; p. 353-61, 1997.

KOMEYA, K., MATSUI. M., In: CAHN ,R.W.; HAASEN, P.; KRAMER, E. J.. **P Materials Science and Technology eds**, 518-565 (wiley – VCH, Weinhein), 1994.

²KRUSCHOV, M. M. **Resistance of metals to wear by abrasion as related to hardness**. In: Conference on lubrication and wear, London, 1957, Proceedings, Institution of Mechanical Engineering, p. 655 - 659. apud

PINTAÚDE, G. **Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza**.2002, s.n. Tese (Doutorado) - EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

LEINFELDER, k. f., New developments in resin restorative systems. **J Am Dent Assoc**. v. 128, n. 5, p. 573-81, 1997.

LEINFELDER, K. F. Posterior composite resins. **J Am Dent Assoc**, v. 117, n. 4, p.21E-26E. Sept. 1988.

LENCINA, D. C., **Fabricação rápida de ferramentas produzidas por estereolitografia e recobertas com níquel-fósforo depositado por eletroless - com estudos de caso em moldagem de plásticos por injeção e fundição em areia aglomerada por resinas do tipo caixa fria**, 2004. 167 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

LIM, B.S., FERRACANE, J.L., CONDON, J.R., ADEY, J.D. et al. Effect of filler fraction surface treatment on wear of microfilled composite. **Dental Materials**, v.18, pp.1-11, 2002.

MAIR L.H. Wear in Dentistry – Current Terminology. **J. Dent.**, v.20, n.3, p.140-144,1992.

³MAIR, L.H. *et al.* Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop. **J Dent**, Oxford, v.24, n.1-2, p.141-148, Jan.-Mar. 1996. apud COSTA, A. D. **Estudo do comportamento mecânico in vitro de dois compósitos restauradores odontológicos contendo nanopartículas** 2007. XVII, 113 f. (COPPE/UFRJ, M.Sc. Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2007) dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro. 2007.

MANO, E.B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2.ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2004. p. 3, 34.

MARSO, F. C.; MATTOS, R; SENSI, L.G. Avaliação das condições de uso dos aparelhos fotopolimerizadores. **Revista Dentística on line**. ano 8, n. 17, ISSN 1518-4889. 2008. <http://www.ufsm.br/dentisticaonline>.

MILLS R. W.; UHL, A.;JANDT, K.D. Optical power outputs, spectra and dental composite depths of cure, obtaneid with blue light emitting diode(LED) and halogen light curing units (LCDs). **Br Dent J**, v. 193, n.8, p. 388- 391, 2002.

MONDAL, D. P., et al., Abrasive wear of Al alloy- Al₂O₃ particle composite: a sutdy on the combined effect of load and size of abrasive. **Wear abrasive**, nº 223, 1998, p.131-138.

ONTIVEROS, J. C.; PARAVIN, R. Light-Emitting Diode Polymerization a Review of Performance, Part I. *Acta Stomatologia Naissi*. V. 22, n. 53, p. 601-610. 2006.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia, microestrutura e propriedades**. São Paulo: Hemus Editora Limitada. 1997.

PEUTZFELDT, A. Resin composites in dentistry; The monomer systems. **Eur J. Oral Sci**, v. 105, n. 2, p. 97- 116, 1997.

PEUTZFELDT A, ASMUSSEN. E. Investigations on polymer structure of dental resinous materials. **Trans Dent Mater**, v. 18, p. 81-104, 2004.

REIS, M.C.; ZAVAGLIA, C.A.C., Projeto e construção de um equipamento para ensaios de desgaste de materiais para uso em próteses ortopédicas. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, v. 15, n. 1-2, p. 31-38, jan/ago 1999.

RUTHERFORD, K.L.; HUTCHINGS I.M. Comments on “Micro-scale abrasive wear testing of PVD coatings on curved substrates”. **Tribology Letters**. v.2 n.1,p. 1-11, 1996.

RUTHERFORD, K.L.; HUTCHINGS I.M. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test. **Journal of Testing and Evaluation**, JTEVA, 25, 2, 250 - 260, 1997.

RUTHERFORD K. L. et al. The abrasive and erosive wear of polymeric paint films. 11th International Conference on Wear of Materials. **Wear**. p. 325-334, 1997.

SANTOS L.A., et al. Microdureza de resina composta: efeito de aparelhos e tempos de polimerização em diferentes profundidades. **Pesq Odontol Bras** 2000;v.14 n.1 p.65-70.

SCHWARTZ, M. M. - **Composite Materials Handbook** - Mc Graw Hill – 1983. p 1.1-1.3.

SERBINO, E. M., **Um Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Disco de Freio Automotivo Ventilado de Ferro Fundido Cinzento Perlítico com Grafita Lamelar**. 2005. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de Engenharia - USP. São Paulo, 2005.

SGARBI, S. C. **Avaliação do grau de conversão de uma resina composta fotoativada por lâmpada halógena de LEDs, por meio de espectrometria no infravermelho e ultravioleta**, 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, curso de Mestrado em Odontologia – área de Concentração em Clínica Integrada, Ponta Grossa. 2006.

SHIPWAY, P.H., NGAO, N.K. , Microscale abrasive wear of polymeric materials, Advanced Materials Group, UK, **Wear**, v. 255, n.2003, p. 742-750.

SILVA, W. M. DA, MELLO, J. D. B. DE, **Simulação de Desgaste Abrasivo Via Eventos Múltiplos**, Ciência e Tecnologia dos Materiais, vol. 18, nº 1/2, 2006.

SKINNER, E. W. **Resinas restauradoras**. In. Materiais Dentários de Sinner. 8 edição – Rio de Janeiro: Guanabara, 1986. p. 155 -77.

SOARES, L. E. S. **Espectroscopia Raman no Infravermelho Próximo (IVP) e Microdureza Vickers no Estudo de Grau de Conversão de Resinas Compostas Polimerizadas com Laser de Argônio e Lâmpada Halógena**. Dissertação (Mestrado) - Univap, São José dos Campos, 2002.

SOUZA, R. C., **Estudo do comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com WC-12Co, WC-17Co, WC-10Co-4Cr e WC-10Ni pelo sistema HVOF**, Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Química de Lorena - Faenquil –Universidade de São Paulo – USP- SP, Brasil, set. 2002.

SOUZA, R. O. de A. et al. Avaliação da resistência à flexão de três resinas compostas de uso laboratorial. **International Journal of Dentistry**, v. 4, n.2, p. 50-54, 2005.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W., Engineering tribology, Butterworth – Heinemann, 2^a edition, p.744, 2001.

STAIA, M.H.; ENRIQUEZ, C.; PUCHI, E.S. Influence of the heat treatment on the abrasive wear resistance of electroless Ni-P. **Surface and Coatings Technology**, n. 94-95, p. 543-548, 1997.

STEVENSON, A.N.J.; HUTCHINGS, I.M. Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test. **Wear**, v.195, n.1-2, p.232-240, 1996.

TREZONA, R.I, HUTCHINGS, Three-body abrasive wear testing of soft materials, **Wear**, 233-235, 209-221. 1999.

TREZONA, R.I., ALLSOPP, D.N., HUTCHINGS, I. M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test, **Wear** 225–229 , 205–214.1999.

TURSSI, C.P., FERRACANE, J.L., SERRA, M.C. Abrasive wear of resin composite as related to finishing and polishing procedures. **Dental Materials**, v. 21, p. 641 – 648, 2005.

VALLI, J.; PALOJARVI, J.; MAKELA, U. **Measurement of coating thickness by using a ball cratering method**. Technical Research Centre of Finland, Report n. 435, 1985.

VANTINE, F. F., **Avaliação in vitro da dureza superficial e da microinfiltração da resina composta condensável polimerizada por lâmpada halógena e laser de argônio, Dissertação (Mestrado) – UNIVAP, São Jose dos Campos , 2001.**

VENHOVEN B. A. M.; GEE A. J.; DAVIDSON, C. L. Polymerization contraction and conversion of light-curing Bis-GMA based methacrylate resins. **Biomaterials**, v. 14, n. 11, p. 871 – 875, 1993.

VERSPUI, M. A., et al, Bed tickness and particle size distribution in three-body abrasion, **Wear**, v. 188, p. 102 – 107, 1995.

VIEIRA, G. F. et al, Análise da irradiação de diversos aparelhos fotopolimerizadores. **Rev Odontol Univ São Paulo**, v. 12, n. 4, p. 395-399, out./dez. 1998.

VINAGRE, A. et. al. **Diodos** emissores de luz (LED) para fotopolimerização. Coimbra – Portugal, **DENTSPLY DeTrey IBERIA**; 2004.

WEIL, R; PARKER, K. The Properties of Electroless Nickel. **In: American Electroplaters and Surface Finishers Society**. Electroless Plating: Fundamentals and Applications. EUA, p. 111-137. 1990.

WANG, L., **Avaliação da resistência à abrasão de resinas compostas “condensáveis” submetidas à escovação simulada, através da alteração de massa e da rugosidade superficial.** 2001, s. n, Dissertação (Mestrado em Odontologia), Faculdade de Odontologia de Bauru, Universidade de São Paulo, Bauru, São Paulo, Brasil.

WITEHEAD, S. A., SHEARER, A. C., WATTS, D. C. et al., 1999, Comparison of two stylus methods for measuring surface texture, **Dental Materials**, v. 15, pp. 79-86.

APÊNDICE A - Valores de diâmetro (m) obtidos nos ensaios de microabrasão por esfera rotativa para os compósitos restauradores I e II.

Amostra	Diâmetro da Cratera (m)					
	APARELHO AH		APARELHO BH		APARELHO CL	
	I	II	I	II	I	II
1	0,00143	0,00137	0,00140	0,00141	0,00142	0,00140
2	0,00140	0,00135	0,00131	0,00141	0,00136	0,00137
3	0,00139	0,00135	0,00136	0,00146	0,00138	0,00140
4	0,00139	0,00136	0,00133	0,00145	0,00140	0,00141
5	0,00139	0,00135	0,00140	0,00142	0,00137	0,00137
6	0,00140	0,00134	0,00137	0,00140	0,00142	0,00137
7	0,00142	0,00137	0,00137	0,00141	0,00139	0,00138
8	0,00140	0,00136	0,00136	0,00146	0,00137	0,00137
9	0,00139	0,00134	0,00139	0,00140	0,00139	0,00141
10	0,00140	0,00137	0,00137	0,00143	0,00137	0,00141