

Flávia de Souza Bastos

*Avaliação da textura superficial e  
comportamento ao desgaste do esmalte  
dentário*

Belo Horizonte – MG

Agosto / 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"AVALIAÇÃO DA TEXTURA SUPERFICIAL E COMPORTAMENTO AO  
DESGASTE DO ESMALTE DENTÁRIO"**

Flávia de Souza Bastos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

---

Prof. Dr. Estevam Barbosa de Las Casas  
DEES-UFMG - (Orientador)

---

Profa. Dra. Geralda Cristina Durães de Godoy  
DEMET-UFMG (Co-orientadora)

---

Profa. Dra. Cláudia Silami de Magalhães  
ODR-UFMG

---

Prof. Dr. Vicente Tadeu Lopes Buono  
DEMET-UFMG

---

Prof. Dr. Hélio José Corrêa Barbosa  
UFJF

Belo Horizonte, 22 de março de 2004

Flávia de Souza Bastos

*Avaliação da textura superficial e  
comportamento ao desgaste do esmalte  
dentário*

Dissertação apresentada à Coordenação do  
Mestrado em Engenharia de Estruturas da  
Universidade Federal de Minas Gerais para a  
obtenção do título de “Mestre em Engenharia  
de Estruturas”.

Orientador:

Estevam Barbosa de Las Casas

Co-orientadora:

Geralda Cristina Durães de Godoy

MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Belo Horizonte – MG

Agosto / 2004

*Dedico esta dissertação ao meu avô José (in memoriam) por ter sido um grande incentivador do meu progresso nos estudos.*

# *Agradecimentos*

A Deus, por ter me confiado saúde e iluminado meus pensamentos, permitindo alcançar  
mais uma realização.

Ao meu esposo Cristhian, que me acompanhou em todos os momentos desta importante  
etapa, por todo o seu amor, colaboração e paciência.

Aos meus pais, Ricardo e Leila, e aos meus sogros, Alaôr e Delma, pelo constante apoio  
e dedicação.

Ao professor Estevam Las Casas, por sua orientação esclarecedora nos trabalhos e,  
principalmente, pelo espírito de amizade que contribuíram para que eu confirmasse a  
minha vocação acadêmica.

À professora Cristina Godoy, por ter me recebido em seu departamento, fornecendo  
valiosos ensinamentos e ferramentas para a concretização deste trabalho.

À professora Tulimar Cornacchia, pelo carinho e apoio ao me integrar no campo da  
odontologia, imprimindo relevância à dissertação.

Ao professor Vicente Buono e à funcionária Patrícia do DEMET, pela cooperação nos  
trabalhos com MEV.

Ao aluno Bruno Romanus do DEMET, pela dedicação na realização dos ensaios de  
perfilometria.

Ao colega Tiago Vieira, do grupo de biomecânica, pela confecção das réplicas e revisão  
do trabalho.

Às secretárias Inês, Lucíola, Renata e Patrícia pela maneira atenciosa com que me  
atenderam durante todo o curso no DEES.

*”Quanto mais amplitude em nossos conhecimentos, mais responsabilidade em nossas ações. Através de nossos pensamentos, palavras e atos, gastamos e transformamos as energias do Senhor, em nossa viagem evolutiva, nos setores da experiência. A vida organiza em nós mesmos a nossa conta agradável ou desagradável ante as Leis do Destino”.*

**André Luiz (Chico Xavier)**

# Resumo

O objetivo de se manter as estruturas dentárias por mais tempo com restaurações cada vez mais semelhantes ao esmalte dentário trouxe a necessidade de investigações sobre as propriedades físicas dos materiais envolvidos, conjugando esforços de profissionais de diversas áreas, tais como ciência dos materiais, engenharia e odontologia. Estes materiais dentários estão sujeitos a diversas solicitações degradantes no ambiente oral, entre elas, o desgaste excessivo de dentes, comumente causado pelo bruxismo, hábito parafuncional de ranger ou apertar os dentes. Este problema, que ocasiona a perda de contato oclusal perfeito e, com isso, distúrbios na eficiência do sistema estomatognático, tem sido estudado pela odontologia com um enfoque voltado, principalmente, para a medição das taxas de desgaste. Entretanto, como este é considerado um problema de contato, torna-se importante conhecer a textura superficial, no que se refere à rugosidade em escala microscópica existente, responsável pela interação entre os corpos. Tentou-se neste trabalho correlacionar a topografia do esmalte dentário com o seu comportamento ao desgaste, obtendo um mapeamento dos mecanismos de desgaste envolvidos. Para isso foram utilizadas técnicas de avaliação microscópica via perfilometria 3D e via microscopia eletrônica de varredura (MEV). Estas duas técnicas proveram ferramentas de análise quantitativa e qualitativa, respectivamente. Para a realização dos procedimentos foram utilizados como amostras três dentes extraídos de funções diferentes na mastigação: um canino, um pré-molar e um molar. Para cada amostra selecionou-se duas áreas, uma aparentemente livre de desgaste e a outra com faceta típica de bruxismo. Estas áreas foram avaliadas e através da análise das diferenças entre as duas superfícies foram propostos os modelos de mecanismos de desgaste responsáveis pelas alterações. Foram confeccionadas réplicas em resina epóxica (“Araldite ®”) de dois dentes pré-molares. Avaliou-se em cada dente e em sua respectiva réplica uma determinada área para que os resultados pudessem ser comparados, de maneira a verificar em qual nível a réplica é capaz de copiar a textura superficial do dente. Este procedimento foi feito com o intuito de se estabelecer uma metodologia que possibilitasse o acompanhamento *in vivo* de indivíduos bruxômanos. Numa última etapa avaliou-se um terceiro molar, recém extraído, que estava semi-incluso, porém livre de contato oclusal, de maneira a caracterizar a superfície de um dente de natureza a mais preservada possível. Os resultados indicam que o esmalte dentário apresenta um perfil topográfico com uma distribuição simétrica, entre picos e vales, relativa aos parâmetros de amplitudes e de concentrações de material. Os valores dos parâmetros de amplitude e densidade de picos são elevados para o dente preservado. Foi possível identificar o padrão incremental de formação do esmalte, através da detecção das periquimácias, tanto via perfilometria quanto via MEV. Verificou-se a existência, para as superfícies degradadas, de mecanismos de origem mecânica somados a reações químicas, produzindo um tipo de desgaste denominado por “desgaste químico”. A existência deste fenômeno foi identificada a partir da verificação no dente degradado da presença de vales muito profundos em relação aos picos. O mecanismo de abrasão, também presente neste tipo de desgaste, diminui sensivelmente as amplitudes dos picos. Os resultados demonstram ainda que predominam

os mecanismos de desgaste por fratura frágil e estes estão fortemente relacionados com os padrões de movimento das superfícies oclusais e com as funções do dente. Além disso, sugerem que o grau de severidade é maior para os dentes posteriores do que para os anteriores. A metodologia de avaliação via perfilometria 3D mostrou-se potencialmente eficaz para a caracterização da textura superficial e para a verificação dos mecanismos de desgaste dentário. A aplicabilidade das réplicas pôde ser avaliada. Além disso, justificou-se a conveniência de se fazer a correlação entre as duas técnicas, perfilometria 3D e MEV, para consolidação das interpretações dos dados.



# *Abstract*

The search for increasing the durability of dental restorations and for dental work more similar to enamel has induced an increase in the research work centered on the physical behavior of the involved materials, bringing together efforts from professionals of different areas, such as material sciences, engineering and dentistry. These dental materials are exposed to the diverse degrading actions present in the oral environment, among them, the dental excessive wear, commonly caused by bruxism, a parafunctional habit of grinding or pressing the teeth. This problem, which causes the loss of perfect occlusal contact and consequently a disturbance in the efficiency of stomatognathic system, has been studied by dentistry mainly focused on measuring wear rates. However, as this is considered a contact problem, it becomes important to know its superficial topography, which is related to the existence of asperities on a smaller scale, responsible for the interaction between opposing bodies. In this work, an attempt is made to correlate the topography of dental enamel to its behavior under wear, obtaining a mapping of the wear mechanisms involved. For this purpose, techniques of microscopic mapping were used via 3D profilometry and scanning electron microscope (SEM). These techniques provided tools for quantitative and qualitative analysis of the problem. For the implementation of the procedures, three extracted teeth of different functions in the mastication were used as samples: a canine, a premolar and a molar tooth. For each sample it was selected two areas, a seemingly wear-free and the other with typical facet of bruxism. These areas were evaluated and, through the analysis of the differences among the two surfaces, the wear mechanisms models responsible by the alterations were proposed. Replicas of two premolar teeth were made in epoxy resin ("Araldite ®"). It was evaluated in each tooth and in its respective replica a certain area so that the results could be compared, in way to verify in which level the replica is capable to copy the tooth superficial texture. This procedure was made with the purpose of defining an *in vivo* method to follow the evolution of wear in bruxism patient. In a last stage a third molar, recently extracted, which was semi-included, but occlusal contact-free, was evaluated in way to characterize the surface of a tooth with the more possible preserved nature. The results indicate that the dental enamel presents a topographical profile with a symmetrical distribution, between peaks and valleys, relative to the parameters of amplitudes as well as to parameters of material concentrations. The values encountered for the amplitude and densities of peaks parameters are high. It was possible to identify the pattern of enamel formation through the detection of the perikymata, so much through profilometry as SEM. It was verified in the degraded tooth the existence of mechanisms of mechanical origin added to chemical reactions, producing a type of wear called "chemical wear". The existence of this phenomenon was identified from the verification in the degraded tooth of the presence of more deep valleys in relation to the peaks. The mechanism of abrasion, also present in this type of wear, significantly decreased the amplitude of the peaks. The results still showed that brittle fracture is the dominant dental wear mechanism, which is strongly associated to the displacement pattern of dental contact surfaces and tooth function. Besides, they suggest that the severity of

damage is higher for posterior teeth. The evaluation methodology via profilometry 3D revealed potentially efficient for the characterization of the superficial topography and for the verification of the mechanisms of dental wear. The applicability of the replicas could be evaluated. The convenience of correlating SEM and profilometry for checking the obtained data and reaching more consistent interpretation of the results was also shown.

# *Conteúdo*

**Lista de Figuras**

**Lista de Tabelas**

<b>Glossário</b>	p. 17
<b>1 Introdução</b>	p. 19
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b>	p. 21
2.1 Superfícies em contato . . . . .	p. 21
2.1.1 Contato elástico . . . . .	p. 21
2.1.2 Contato plástico . . . . .	p. 22
2.1.3 Teoria simplificada para o contato com múltiplas asperezas . . . . .	p. 23
2.1.4 Teoria estatística . . . . .	p. 23
2.1.5 Limite de deformação elástica . . . . .	p. 25
2.2 Mecanismos fundamentais de desgaste . . . . .	p. 27
2.3 Desgaste abrasivo . . . . .	p. 29
2.3.1 Desgaste abrasivo por deformação plástica . . . . .	p. 29
2.3.2 Desgaste abrasivo por fratura frágil . . . . .	p. 30
2.4 Topografia Superficial . . . . .	p. 35
2.4.1 Análise via Perfilometria . . . . .	p. 35
2.4.2 Filtragem da superfície . . . . .	p. 35
2.5 Características físicas do esmalte dentário . . . . .	p. 37
2.5.1 Linhas Incrementais de Retzius . . . . .	p. 39
2.5.2 Estruturas de superfície . . . . .	p. 39
2.6 Desgaste dentário . . . . .	p. 42
2.6.1 Bruxismo . . . . .	p. 43

2.6.2	Avaliação de desgaste dentário . . . . .	p. 44
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	p. 47
3.1	Introdução . . . . .	p. 47
3.2	Amostras . . . . .	p. 47
3.2.1	Canino . . . . .	p. 48
3.2.2	Pré-molar . . . . .	p. 49
3.2.3	Molar . . . . .	p. 50
3.2.4	Terceiro Molar . . . . .	p. 51
3.2.5	Réplicas . . . . .	p. 51
3.3	Perfilometria . . . . .	p. 53
3.3.1	Equipamento . . . . .	p. 53
3.3.2	Medições . . . . .	p. 53
3.4	Parâmetros de textura superficial . . . . .	p. 54
3.4.1	Parâmetros de amplitude . . . . .	p. 54
3.4.2	Parâmetros de espaçamento . . . . .	p. 55
3.4.3	Parâmetros híbridos . . . . .	p. 56
3.4.4	Parâmetros da curva Abbott-Firestone (curva de razão de área de suporte) . . . . .	p. 56
3.4.5	Parâmetros Funcionais . . . . .	p. 58
3.5	Microscopia eletrônica de varredura . . . . .	p. 58
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	p. 60
4.1	Terceiro molar . . . . .	p. 60
4.1.1	Superfícies medidas . . . . .	p. 60
4.1.2	Justificativa de corte . . . . .	p. 60
4.2	Parâmetros de textura superficial . . . . .	p. 62
4.2.1	Discussão dos parâmetros . . . . .	p. 62
4.2.2	Microscopia eletrônica de varredura . . . . .	p. 63
4.3	Canino . . . . .	p. 65
4.3.1	Superfícies medidas . . . . .	p. 65

4.3.2	Justificativa de corte . . . . .	p. 65
4.3.3	Parâmetros de textura superficial . . . . .	p. 68
4.3.4	Discussão dos parâmetros . . . . .	p. 68
4.3.5	Microscopia eletrônica de varredura . . . . .	p. 69
4.4	Pré-molar . . . . .	p. 71
4.4.1	Superfícies medidas . . . . .	p. 71
4.4.2	Justificativa de corte . . . . .	p. 72
4.4.3	Parâmetros de textura superficial . . . . .	p. 73
4.4.4	Discussão dos parâmetros . . . . .	p. 73
4.5	Molar . . . . .	p. 76
4.5.1	Superfícies medidas . . . . .	p. 76
4.5.2	Justificativa de corte . . . . .	p. 77
4.5.3	Parâmetros de textura superficial . . . . .	p. 78
4.5.4	Discussão dos parâmetros . . . . .	p. 78
4.5.5	Microscopia eletrônica de varredura . . . . .	p. 79
4.6	Réplicas . . . . .	p. 81
4.6.1	Superfícies medidas para a primeira réplica . . . . .	p. 81
4.6.2	Superfícies medidas para a segunda réplica . . . . .	p. 83
4.6.3	Justificativa de corte . . . . .	p. 85
4.7	Parâmetros de textura superficial . . . . .	p. 86
4.7.1	Discussão dos parâmetros . . . . .	p. 87
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	p. 88
5.1	Conclusões . . . . .	p. 88
5.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	p. 89
	<b>Bibliografia</b>	p. 90

# *Lista de Figuras*

1	Distribuição da tensão normal (pressão de contato) de uma esfera pressionada elasticamente contra um plano (HUTCHINGS, 1992) . . . . .	p. 22
2	Modelo para o contato entre uma superfície rugosa e uma superfície plana rígida (HUTCHINGS, 1992) . . . . .	p. 23
3	Desgaste triboquímico . . . . .	p. 28
4	Fadiga . . . . .	p. 28
5	Adesão . . . . .	p. 28
6	Abrasão . . . . .	p. 28
7	Geometria do contato entre uma partícula abrasiva idealizada cônica e uma superfície: (a) em elevação; (b) em vista plana (HUTCHINGS, 1992) .	p. 29
8	Geometria de uma trinca Hertziana em forma de cone formada por uma esfera carregada normalmente sobre uma superfície plana de material frágil (HUTCHINGS, 1992) . . . . .	p. 31
9	Série de trincas em forma de arcos causada pelo deslizamento de uma esfera sobre um sólido frágil, sob carregamento normal (HUTCHINGS, 1992)	p. 31
10	Diagrama mostrando a formação de trincas em um material frágil devido à indentação (HUTCHINGS, 1992) . . . . .	p. 32
11	Ilustração esquemática da remoção em um material frágil pela extensão de uma trinca lateral sob um sulco plástico (HUTCHINGS, 1992) . . . . .	p. 33
12	Princípios de operação de um perfilômetro . . . . .	p. 36
13	Detalhes da coluna e unidade transversal de um perfilômetro . . . . .	p. 36
14	Detalhes do braço e ponta de um perfilômetro . . . . .	p. 37
15	Exemplo do uso de diferentes comprimentos de onda de corte na separação dos perfis de ondulação e rugosidade (MUMMERY, 1992) . . . . .	p. 38
16	Esquema indicando a orientação geral dos prismas de esmalte na coroa dentária. <b>A</b> - dente decíduo. <b>B</b> - dente permanente (BHASKAR, 1989) . .	p. 39
17	Linhas incrementais de Retzius em lamelas longitudinais desgastadas. <b>A</b> , região de cúspide. <b>B</b> , região cervical (BHASKAR, 1989) . . . . .	p. 40

18	Linhas incrementais de Retzius em lamela transversal de dente desgastado; arranjo concêntrico (BHASKAR, 1989) . . . . .	p. 40
19	Microrradiografia de lamela desgastada de esmalte humano. A camada superficial (seta) relativamente sem estrutura é mais radiopaca do que o corpo de esmalte abaixo dela (aproximadamente x200) (BHASKAR, 1989)	p. 41
20	Paciente de 12 anos de idade (BHASKAR, 1989) . . . . .	p. 41
21	Paciente de 25 anos de idade (BHASKAR, 1989) . . . . .	p. 41
22	Paciente de 52 anos de idade - réplica negativa (BHASKAR, 1989) . . . . .	p. 42
23	Superfície desgastada até tornar-se lisa (BHASKAR, 1989) . . . . .	p. 42
24	Faces do canino (CARVALHO, 2004) . . . . .	p. 48
25	Esquema ilustrando a seleção de áreas para avaliação do canino . . . . .	p. 49
26	Faces do pré-molar (CARVALHO, 2004) . . . . .	p. 49
27	Esquema ilustrando a seleção de áreas para avaliação do pré-molar e molar	p. 50
28	Faces do molar (CARVALHO, 2004) . . . . .	p. 50
29	Plataforma de gesso tipo pedra com dentes . . . . .	p. 51
30	Plataforma pressionada contra a silicona na moldeira . . . . .	p. 52
31	Plataforma separada da moldeira . . . . .	p. 52
32	Réplica negativa dos dentes . . . . .	p. 52
33	Réplica positiva dos dentes . . . . .	p. 52
34	Perfilômetro . . . . .	p. 53
35	Primeiro exemplo de perfis diferentes com o mesmo valor de Sa (PRECISION DEVICES, INC., 2004) . . . . .	p. 55
36	Segundo exemplo de perfis diferentes com o mesmo valor de Sa (PRECISION DEVICES, INC., 2004) . . . . .	p. 55
37	Cálculo da inclinação média da superfície (MUMMERY, 1992) . . . . .	p. 56
38	Curva de material Abbott-Firestone (MUMMERY, 1992) . . . . .	p. 57
39	Extração dos parâmetros Sk a partir da curva de material (PRECISION DEVICES, INC., 2004) . . . . .	p. 57
40	Representação da área de contato (MUMMERY, 1992) . . . . .	p. 58
41	Detalhe da faceta horizontal localizada na face incisal do canino. Foto com ampliação de 12 vezes . . . . .	p. 59
42	Detalhe das facetas horizontais localizadas na face oclusal do molar. Foto com ampliação de 13 vezes . . . . .	p. 59

43	Perfil de rugosidade da superfície não desgastada do terceiro molar . . . . .	p. 61
44	Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície não desgastada do terceiro molar . . . . .	p. 61
45	Curva de material da superfície não desgastada do terceiro molar . . . . .	p. 61
46	Níveis de corte a 1% e a 99% de material . . . . .	p. 61
47	Superfície do terceiro molar ampliada 200 vezes . . . . .	p. 64
48	Superfície do terceiro molar ampliada 3500 vezes . . . . .	p. 64
49	Perfil de rugosidade da superfície não desgastada do canino . . . . .	p. 65
50	Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície não desgastada do canino . . . . .	p. 65
51	Perfil de rugosidade da superfície desgastada do canino . . . . .	p. 66
52	Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície desgastada do canino . . . . .	p. 66
53	Curva de material da superfície não desgastada do canino . . . . .	p. 66
54	Níveis de corte a 1% e a 99% de material . . . . .	p. 66
55	Curva de material da superfície desgastada do canino . . . . .	p. 67
56	Níveis de corte a 1% e a 99% de material . . . . .	p. 67
57	Superfície não desgastada do canino ampliada 750 vezes (elétrons retroespalhados) . . . . .	p. 70
58	Superfície desgastada do canino ampliada 750 vezes (elétrons retroespalhados) . . . . .	p. 70
59	Perfil de rugosidade da superfície não desgastada do pré-molar . . . . .	p. 71
60	Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície não desgastada do pré-molar . . . . .	p. 71
61	Perfil de rugosidade da superfície desgastada do pré-molar . . . . .	p. 72
62	Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície desgastada do pré-molar . . . . .	p. 72
63	Curva de material da superfície não desgastada do pré-molar . . . . .	p. 73
64	Níveis de corte a 1% e a 99% de material . . . . .	p. 73
65	Curva de material da superfície desgastada do pré-molar . . . . .	p. 73
66	Níveis de corte a 1% e a 99% de material . . . . .	p. 73
67	Perfil de rugosidade da superfície não desgastada do molar . . . . .	p. 76



68	Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície não desgastada do molar . . . . .	p. 76
69	Perfil de rugosidade da superfície desgastada do molar . . . . .	p. 77
70	Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície desgastada do molar . . . . .	p. 77
71	Curva de material da superfície não desgastada do molar . . . . .	p. 77
72	Níveis de corte a 1% e a 99% de material . . . . .	p. 77
73	Curva de material da superfície desgastada do molar . . . . .	p. 78
74	Níveis de corte a 1% e a 99% de material . . . . .	p. 78
75	Superfície não desgastada do molar ampliada 100 vezes . . . . .	p. 80
76	Superfície desgastada do molar ampliada 100 vezes . . . . .	p. 80
77	Perfil de rugosidade da superfície do primeiro pré-molar a ser copiado . .	p. 81
78	Perfil de rugosidade, invertido em relação à linha média, da superfície do primeiro dente a ser copiado . . . . .	p. 81
79	Perfil de rugosidade da superfície da primeira réplica . . . . .	p. 82
80	Perfil de rugosidade, invertido em relação à linha média, da primeira réplica	p. 82
81	Perfil de rugosidade da superfície do segundo dente a ser copiado . . . . .	p. 83
82	Perfil de rugosidade, invertido em relação à linha média, da superfície do segundo dente a ser copiado . . . . .	p. 83
83	Perfil de rugosidade da superfície da segunda réplica . . . . .	p. 84
84	Perfil de rugosidade, invertido em relação à linha média, da segunda réplica	p. 84
85	Curva de material da primeira réplica . . . . .	p. 85
86	Curva de material do segundo dente . . . . .	p. 85
87	Curva de material da segunda réplica . . . . .	p. 86

## *Lista de Tabelas*

- 1 Parâmetros de textura superficial obtidos para o terceiro molar . . . . . p.62
- 2 Parâmetros de textura superficial obtidos para as superfícies não desgastada e desgastada do canino . . . . . p.68
- 3 Parâmetros de textura superficial obtidos para as superfícies não desgastada e desgastada do pré-molar . . . . . p.74
- 4 Parâmetros de textura superficial obtidos para as superfícies não desgastada e desgastada do molar . . . . . p.79
- 5 Parâmetros de textura superficial obtidos para o primeiro dente e para a primeira réplica . . . . . p.86
- 6 Parâmetros de textura superficial obtidos para o segundo dente e para a segunda réplica . . . . . p.87

## *Glossário*

APICAL: Relativo ao ápice de uma estrutura piramidal ou cônica.

ÁPICE: Extremidade de uma estrutura cônica ou piramidal, como a raiz de um dente, um pulmão ou o coração.

CONTATO EXCÊNTRICO: Diz-se de qualquer contato oclusal que tem lugar fora da relação ou da oclusão cêntrica.

CONTATO OCLUSAL: Qualquer um dos contatos que têm lugar entre superfícies oclusais de dentes antagonistas.

COROA: Porção do dente humano coberta pelo esmalte; substituto artificial da coroa de um dente natural.

CÚSPIDE: Eminência pontiaguda ou arredondada nas superfícies mastigatórias dos dentes, ou em sua proximidade.

DECÍDUO: Relativo à primeira dentição.

DENTINA: Tecido calcificado que forma a maior parte do dente; substância ebúrnea percorrida por túbulos que contém os prolongamentos dos odontoblastos.

LINHA CERVICAL: linha demarcatória entre a coroa e a raiz.

LINHAS DE RETZIUS: Surgem como bandas castanhas em cortes desgastados de esmalte. Ilustram o padrão incremental do esmalte, isto é, a aposição sucessiva de camadas de esmalte durante a formação da coroa.

JUNÇÃO AMELOCEMENTÁRIA: superfície de contato entre o cimento e o esmalte.

JUNÇÃO AMELODENTINÁRIA: superfície de contato entre o esmalte e a dentina subjacente.

JUNÇÃO CEMENTODENTINÁRIA: superfície de contato entre o cimento e a dentina subjacente.

OCLUSAL: Pertencente ou relativo a oclusão; diz respeito à superfície de um dente que está voltada para ou faz contato com um dente do arco oposto.

PALATAL: Pertencente ou relativo ao palato ou aos ossos palatinos; diretamente voltado para o palato.

PERIQUIMÁCIAS: Sulcos ondulados, transversais ao longo eixo da coroa, que se acredita refletirem na superfície as linhas de Retzius.

POLPA DENTÁRIA: Órgão que ocupa a parte central do dente, constituído de vasos

sangüíneos, nervos e elementos celulares, inclusivamente odontoblastos que formam a dentina.

**SUPERFÍCIE AXIAL:** Diz-se de qualquer uma das superfícies de um dente que são paralelas ao seu eixo maior.

**SUPERFÍCIE DE CONTATO:** Diz-se da superfície de um dente voltada para o dente adjacente do mesmo arco.

**SUPERFÍCIE LABIAL:** superfície voltada para os lábios.

**SUPERFÍCIE PALATINA:** superfície voltada para a língua.

**SUPERFÍCIE VESTIBULAR:** superfície voltada para o vestibulo (parte localizada entre os arcos dentais e os lábios/bochechas).

# 1 *Introdução*

Nas últimas décadas, o aumento da expectativa de vida trouxe a necessidade de se manter as estruturas dentárias por mais tempo. A busca pela saúde bucal foi responsável pela evolução e desenvolvimento de novas técnicas, materiais e equipamentos para a preservação e restauração dos dentes. Acompanhando esta tendência, cresce o desejo de se obter restaurações cada vez mais semelhantes ao dente natural, tanto em relação às suas propriedades mecânicas, quanto à estética. Uma vez que o esmalte humano forma um revestimento protetor duro e resistente ao desgaste precisa ser profundamente investigado para que se tenha uma base de dados de características que sirvam de referência para os demais materiais pesquisados.

Uma das considerações relevantes para a caracterização de um material é o seu comportamento em relação ao desgaste. Tratando-se de dentes, um estudo sobre o desgaste é fundamental, uma vez que este resultado das funções fisiológicas e patológicas da cavidade bucal é um dos mais importantes problemas tribológicos do corpo humano. O desgaste excessivo pode causar a perda do contato oclusal perfeito entre dentes opostos e com isso distúrbios na eficiência do sistema mastigatório. Pode levar ainda à exposição da dentina e a uma subsequente perda de tecido mais severa, devido à dentina ter menor resistência ao desgaste. Em condições extremas a polpa pode ser envolvida no processo.

A literatura mostra que este problema tem recebido muita atenção do campo da odontologia, com o desenvolvimento de inúmeros testes de desgaste do tipo pino-disco, levando-se em conta a magnitude das forças aplicadas intra-bucalmente e os padrões de movimentos mandibulares. Entretanto, a maioria dos pesquisadores tem se ocupado em medir o volume desgastado após o teste e em avaliar a perda anatômica dos dentes, enquanto que os mecanismos envolvidos raramente são investigados. Estes procedimentos incluem extensivos e cuidadosos estudos clínicos, mas permitem observar somente mudanças macroscópicas nas estruturas, detectáveis após grandes intervalos de tempo.

Sabe-se, entretanto, pelas teorias clássicas do contato, que a interação entre as superfícies se dá pelas minúsculas asperezas contidas em cada material. Com isso surge a concepção de que métodos de avaliação microscópica são necessários para quantificar e qualificar o desgaste em intervalos de tempo menores. É por isso que se torna necessária a cooperação de profissionais das áreas de engenharia e ciências dos materiais de modo a obter cada vez mais ferramentas para uma análise não só experimental, como também teórica e numérica do problema, evidenciando o entendimento dos mecanismos envolvidos.

Neste trabalho serão levantadas informações sobre as interações entre as superfícies e sobre os métodos de avaliação microscópica. Também serão realizados ensaios de perfilometria 3D e microscopia eletrônica de varredura sobre amostras de dentes extraídos com os seguintes objetivos:

- estabelecer metodologias para caracterizar a superfície do esmalte dentário;
- determinar as alterações nesta superfície devido ao bruxismo;
- buscar determinar os mecanismos de desgaste em dentes através destas alterações;
- avaliar a aplicabilidade do uso de réplicas para acompanhamento da progressão do desgaste em dentes de pacientes.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Superfícies em contato

O contato entre duas superfícies planas e paralelas ocorre, inicialmente, apenas em alguns pontos, devido à existência, mesmo em superfícies cuidadosamente preparadas, de rugosidade em escala microscópica. Conforme se aumenta a carga normal, as superfícies tornam-se mais íntimas, ou seja, um número maior de asperezas entra em contato. São essas asperezas as responsáveis por suportar a carga e gerar qualquer força de atrito. Desta forma, o conhecimento da topografia das superfícies e uma compreensão da interação entre elas é essencial para qualquer estudo de atrito, desgaste e lubrificação.

#### 2.1.1 Contato elástico

O primeiro modelo para estudar o comportamento de duas superfícies em contato baseia-se em uma esfera de material elástico pressionada contra um plano rígido sob uma carga normal  $w$ . O contato ocorre sobre uma área circular de raio  $a$ , dado pela seguinte fórmula:

$$a = \left( \frac{3wr}{4E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.1)$$

onde:

$r$  é o raio da esfera;

$E$  é o módulo de elasticidade que depende dos módulos de Young,  $E_1$  e  $E_2$ , e dos coeficientes de Poisson,  $\nu_1$  e  $\nu_2$ , para os materiais da esfera e do plano da seguinte forma:

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2.2)$$

Assim a área de contato entre a esfera e o plano,  $\pi a^2$ , é dada por:

$$\pi a^2 \approx 0,83\pi \left( \frac{wr}{E} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.3)$$

Para este caso, no qual a deformação é puramente elástica, a área de contato é proporcional a  $w^{2/3}$ . A tensão normal sobre a área de contato é  $w/\pi a^2$  e varia com  $w^{1/3}$ . A tensão

não é uniforme sobre a área circular, mas é máxima no centro e decresce até zero nas extremidades (FIG. 1). A tensão máxima no centro do círculo de contato é  $3/2$  vezes a tensão média.

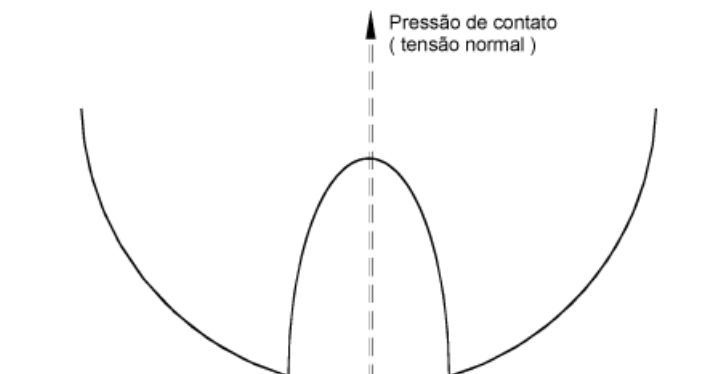


Figura 1: Distribuição da tensão normal (pressão de contato) de uma esfera pressionada elasticamente contra um plano (HUTCHINGS, 1992)

### 2.1.2 Contato plástico

Conforme a carga normal entre a esfera e o plano aumenta, um ou os dois componentes podem se deformar plasticamente. Para efeito de simplificação consideram-se duas situações: quando a esfera for rígida e a deformação plástica ficar confinada ao plano e quando o plano não se deforma e ocorrer deformação plástica apenas na esfera (HUTCHINGS, 1992).

Através das análises de Hertz do campo de tensão elástico para um indentador esférico rígido numa superfície plana, demonstra-se que a máxima tensão de cisalhamento ocorre a uma profundidade de  $0,47a$ , onde  $a$  é o raio do círculo de contato. A deformação plástica ocorrerá nesse ponto se o limite de escoamento for alcançado.

Aumentando-se a carga normal, a zona de deformação plástica poderá se estender, eventualmente, até a superfície. A área de contato é ainda extremamente pequena, com um raio menor do que 1% do raio da esfera. A tensão média sobre a área de contato é em torno de  $3Y$ , onde  $Y$  é o limite de escoamento, e permanece com este valor para subseqüentes aumentos de carga. Portanto, a área de contato é proporcional à carga.

Para indentadores de formas diferentes, como cônicos ou piramidais, são encontrados resultados similares. A constante de proporcionalidade entre a tensão na área de contato e o limite de escoamento depende da geometria do indentador, mas nunca é muito diferente de 3.

Para o caso da deformação plástica ocorrer na esfera, se esta for mais macia do que o plano, os resultados são semelhantes, ou seja, a deformação plástica ocorre quando a tensão no contato alcança o valor de  $3Y$ .



### 2.1.3 Teoria simplificada para o contato com múltiplas asperezas

Supondo que uma superfície rugosa consista de uma série de asperezas de mesma altura e raio e que cada uma deforme independentemente da outra, cada aspereza suporta a mesma fração de carga e contribui com a mesma fração de área. Somando as contribuições de todas as asperezas, podemos mostrar que a área total de contato,  $\mathbf{A}$ , está relacionada com a carga total,  $\mathbf{W}$ , da mesma maneira que a área de contato individual de cada aspereza,  $\pi a^2$ , está relacionada com a carga suportada por cada aspereza,  $\mathbf{w}$ . Para o caso de contato perfeitamente elástico:

$$A \propto W^{\frac{2}{3}} \quad (2.4)$$

e para contato perfeitamente plástico:

$$A \propto W \quad (2.5)$$

Superfícies reais, entretanto, não são compostas de asperezas uniformes de mesmo raio e altura. Na verdade, estas são estatisticamente distribuídas. Conforme a carga em uma superfície real é aumentada, não apenas a área de contato de cada aspereza aumenta, como também o número de asperezas a entrar em contato e a suportar carga cresce. Sob tais circunstâncias, se a área média de contato para cada aspereza permanecer constante e o aumento na carga for suportado por um correspondente aumento no número de asperezas em contato, então, mesmo para um contato perfeitamente elástico, a área total será diretamente proporcional à carga.

### 2.1.4 Teoria estatística

Para o modelo de Greenwood e Williamson (1966) todas as asperezas têm superfície esférica de mesmo raio  $\beta$  e se deformam elasticamente sob carregamento de acordo com as equações de Hertz. A FIG. 2 ilustra o contato entre uma superfície rugosa e uma superfície plana rígida.

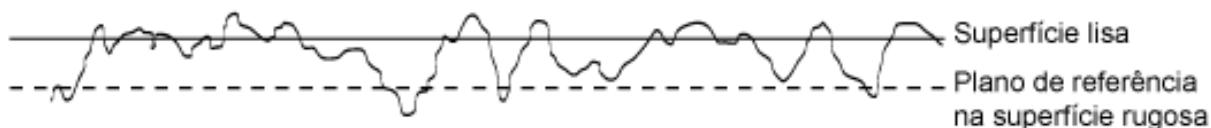


Figura 2: Modelo para o contato entre uma superfície rugosa e uma superfície plana rígida (HUTCHINGS, 1992)

A altura de uma aspereza individual é  $\mathbf{z}$ . Se a separação entre o plano de referência e a superfície plana,  $\mathbf{d}$ , for menor que  $\mathbf{z}$ , então a aspereza estará elasticamente comprimida,

suportará uma carga  $\mathbf{w}$ :

$$w = \frac{4}{3} E \beta^{\frac{1}{2}} (z - d)^{\frac{3}{2}} \quad (2.6)$$

e estará em contato com o plano sobre uma área individual,  $\mathbf{A}_i$  :

$$A_i = \pi \beta (z - d) \quad (2.7)$$

As alturas das asperezas estão estatisticamente distribuídas. A probabilidade de uma aspereza ter uma altura entre  $z$  e  $z + dz$  é  $\varphi(z) dz$ , onde  $\varphi(z)$  é uma função de densidade descrevendo as alturas das asperezas.

A probabilidade de uma aspereza entrar em contato com um plano oposto é a probabilidade da sua altura ser maior que a separação  $d$ :

$$prob(z > d) = \int_d^{\infty} \varphi(z) dz \quad (2.8)$$

Se existirem um total de  $\mathbf{N}$  asperezas na superfície, então, o número de contatos,  $\mathbf{n}$ , será dado por:

$$n = N \int_d^{\infty} \varphi(z) dz \quad (2.9)$$

A carga total suportada por todas as asperezas,  $\mathbf{W} = \mathbf{n}\mathbf{w}$ , será dada por:

$$W = \frac{4}{3} N E \beta^{\frac{1}{2}} \int_d^{\infty} (z - d)^{\frac{3}{2}} \varphi(z) dz \quad (2.10)$$

e a área total de contato,  $\mathbf{A}_p = \mathbf{n}\mathbf{A}_i$ , por:

$$A_p = \pi N \beta \int_d^{\infty} (z - d) \varphi(z) dz \quad (2.11)$$

Torna-se conveniente introduzir variáveis padronizadas e descrever as alturas em termos do desvio padrão  $\sigma$  da distribuição de alturas. Assim:

$$A = \pi N \beta \sigma F_1(h) \quad (2.12)$$

$$W = \frac{4}{3} N E \beta^{\frac{1}{2}} \sigma^{\frac{3}{2}} F_{\frac{3}{2}}(h) \quad (2.13)$$

Onde  $\mathbf{h}$  é a separação padronizada  $d/\sigma$  e

$$F_n(h) = \int_h^{\infty} (z - d)(s - h)^n \varphi^*(s) ds \quad (2.14)$$

$\varphi^*$  é a distribuição de altura normalizada de modo que o desvio padrão seja unitário.

Greenwood e Williamson (1966) estudaram o comportamento do seu modelo para diferentes distribuições de altura. Se as alturas das asperezas seguem uma distribuição exponencial então as equações 2.10 e 2.11 podem ser integradas analiticamente. A carga  $\mathbf{W}$  encontrada é linearmente proporcional à área real de contato. Conforme a carga é aumentada, o tamanho de cada contato local aumenta, entretanto mais asperezas entram em contato, de maneira que o tamanho médio de cada aspereza em contato permanece constante.

$$A = \pi N \beta \sigma e^{-h} \quad (2.15)$$

$$W = \pi^{\frac{1}{2}} N \beta \sigma E \left( \frac{\sigma}{\beta} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-h} \quad (2.16)$$

Embora a distribuição exponencial seja uma boa descrição para muitas superfícies, a distribuição gaussiana (normal) mostrou-se, experimentalmente, como o melhor modelo de distribuição de alturas. Para uma distribuição normal as equações 2.10 e 2.11 precisam ser integradas numericamente, mas os resultados não são muito diferentes dos encontrados para a distribuição exponencial. A área real de contato prevista pela teoria é diretamente proporcional à carga e efetivamente independente da área de contato nominal.

### 2.1.5 Limite de deformação elástica

Através do trabalho de Tabor (1951) sobre o ensaio de dureza, sabe-se que o início da deformação plástica ocorre quando a tensão máxima de Hertz,  $\mathbf{q}_0$ , entre uma esfera e um plano alcança o valor de  $\mathbf{0}, \mathbf{6H}$ , onde  $\mathbf{H}$  é a dureza.

Em engenharia dureza é mais comumente definida como a resistência de um material à indentação. Indentação é o ato de se apertar uma esfera ou uma ponta dura contra a amostra de um material com uma força conhecida de modo a criar uma depressão. Esta depressão, ou indentação, resulta da deformação plástica abaixo do indentador. Nos ensaios de indentação de esferas, a dureza,  $\mathbf{H}$ , é a razão entre a carga aplicada e a área formada na depressão, resultando em unidade de pressão.

Considerando o plano como uma superfície rugosa, uma vez que a depressão causada em cada aspereza é:

$$w = \left( \frac{1}{2} \pi \right)^2 q_0^2 \frac{\beta}{E^2} \quad (2.17)$$

o valor crítico do deslocamento elástico na aspereza necessário para deformação plástica é:

$$w_p = 0.89\beta \left(\frac{H}{E}\right)^2 \quad (2.18)$$

Como a deformação plástica ocorre internamente e está restrita pela vizinhança de material elástico, podemos convenientemente aumentar o valor do deslocamento crítico (GREENWOOD; WILLIAMSON, 1966):

$$w_p = \beta \left(\frac{H}{E}\right)^2 \quad (2.19)$$

Se a probabilidade de uma aspereza entrar em contato for:

$$prob(z > d) = \int_d^\infty \varphi(z) dz \quad (2.20)$$

onde  $\mathbf{z}$  é a altura individual de cada aspereza e  $\mathbf{d}$  é a separação entre o plano de referência e a esfera. Então, a probabilidade do contato ser plástico será:

$$prob(z > d + w_p) = \int_{d+w_p}^\infty \varphi(z) dz \quad (2.21)$$

e a área total de contato plástico será:

$$A_p = \pi N \beta \int_{d+w_p}^\infty (z - d) \varphi(z) dz \quad (2.22)$$

ou ainda:

$$A_p = \pi N \beta \int_{d+w_p^*}^\infty (s - h) \varphi^*(s) ds \quad (2.23)$$

onde:

$$w_p^* = \frac{w_p}{\sigma} = \frac{\beta}{\sigma} \left(\frac{H}{E}\right)^2 \quad (2.24)$$

é o deslocamento elástico crítico padronizado.

Substituindo

$$\psi = (w_p^*)^{-\frac{1}{2}} = \frac{E}{H} \sqrt{\frac{\sigma}{\beta}} \quad (2.25)$$

obtemos um parâmetro mais satisfatório, chamado de índice de plasticidade, uma vez que ele cresce com o aumento da rugosidade. Este índice combina propriedades do material com a sua topografia.

A princípio, o índice de plasticidade determina a carga crítica para a qual a deformação muda de elástica para plástica. Entretanto, o cálculo desta carga é pouco relevante se considerarmos o índice de plasticidade como um parâmetro qualitativo de caracterização da natureza de contato. Embora teoricamente o índice de plasticidade possa assumir qualquer valor de 0 até  $\infty$ , na prática esse valor varia de 0,1 até 100. Apenas para o intervalo de 0,6 a 1 o modo de deformação é duvidoso. Quando  $\psi$  for menor do que 0,6, deformação plástica só poderá ocorrer se a pressão nominal entre as superfícies for extremamente grande, caracterizando um contato essencialmente elástico. Já quando  $\psi$  for maior que 1, deformação plástica ocorrerá mesmo para pressões nominais triviais, caracterizando um contato plástico.

Uma vez que o desgaste muda a topografia de uma superfície, o índice de plasticidade também varia, portanto o estudo deste índice pode ajudar a mapear o mecanismo de desgaste atuante. A maneira como  $\psi$  varia é mais significativa do que o seu valor absoluto.

Whitehouse e Archard (1970) ressaltam que o índice de plasticidade sugerido por Greenwood e Williamson (1966) leva em conta que apenas os topos das asperezas estão envolvidos no contato, ou seja, a existência de asperezas de diferentes escalas superpostas é ignorada. O cálculo do índice de plasticidade assume que a deformação de cada aspereza é independente. Portanto ele só tem significado se for aplicado às asperezas de longo comprimento de onda da superfície (o mesmo que perfil não filtrado que será explicado na seção 2.4.2). Ele indica a probabilidade de ocorrer deformação plástica sobre regiões associadas a esta escala de tamanhos. Se valores de  $\beta$  correspondentes a uma escala menor de rugosidade forem utilizados, os argumentos para o cálculo do índice tornam-se inválidos, pois as deformações das asperezas adjacentes interagem.

Uma definição alternativa para o índice de plasticidade foi proposto por Mikic (1974):

$$\psi = \frac{E}{H} \sigma_m \quad (2.26)$$

onde  $\sigma_m$  é inclinação média quadrática (“root mean square slope”) da superfície, obtida diretamente do traçado do perfil. Esta definição elimina a dificuldade do uso de duas grandezas estatísticas que não são independentes.

## 2.2 Mecanismos fundamentais de desgaste

Sempre que duas superfícies movem-se uma sobre a outra o desgaste ocorre, danificando-se uma ou as duas superfícies, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Na maioria dos casos o desgaste é prejudicial, levando a crescentes remoções dos componentes, liberando restrições ao movimento, gerando a perda de precisão, vibração e até fadiga (HUTCHINGS, 1992).

Os mecanismos fundamentais do desgaste por deslizamento podem ser resumidos em qua-

tro tipos, que são o desgaste por adesão, por abrasão, por fadiga e o triboquímico.

O mecanismo de desgaste triboquímico envolve o acoplamento de processos mecânicos e químicos que agem na interface e no ambiente. Este tipo de desgaste ocorre quando uma camada de reação química formada numa superfície se desfaz pelo contato com a contraface. Uma camada de reação fresca se formará na superfície exposta e será removida no próximo encontro (FIG. 3). O material removido resultará em fragmentos (debris) que poderão se aglomerar em partículas maiores (MAIR, 1996).

O desgaste por fadiga envolve a nucleação de trincas dentro da zona plástica formada na sub-superfície do material quando este é submetido a uma série de deslizamentos repetitivos. Estas trincas crescem, unem-se e podem se estender até a superfície levando ao destacamento de um fragmento (FIG. 4).

No desgaste por adesão, a pressão de contato pode levar a uma junção (soldagem) das asperezas quando deformadas plasticamente e o deslizamento à ruptura destas junções, sendo que a linha de separação não será necessariamente coincidente com a original (FIG. 5). O resultado final será a transferência de material de uma superfície para a outra.

O desgaste por abrasão envolve a presença de partículas duras que são arrastadas sobre uma superfície de um material mais macio (FIG. 6). Quando essas partículas são elementos de uma ou das duas superfícies o desgaste é conhecido como abrasão de dois corpos. Quando elas são componentes separados entre as superfícies deslizantes, então o desgaste é conhecido como abrasão de três corpos. Se as partículas são carregadas por uma corrente de gás ou um fluxo líquido sob pressão, então, em engenharia, isto é conhecido como erosão.

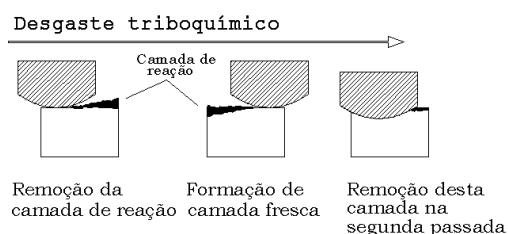


Figura 3: Desgaste triboquímico

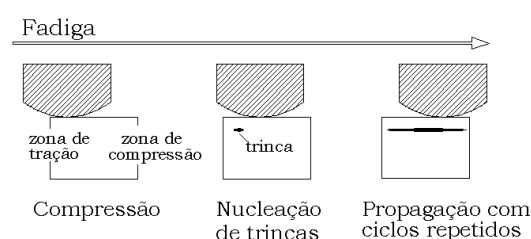


Figura 4: Fadiga

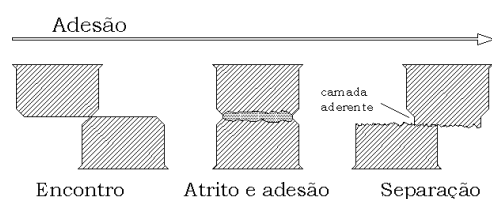


Figura 5: Adesão

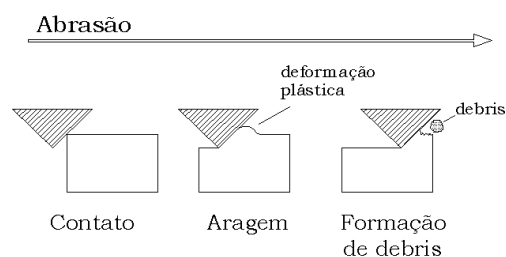


Figura 6: Abrasão

## 2.3 Desgaste abrasivo

Os mecanismos de desgaste por abrasão podem envolver tanto deformação plástica quanto fratura frágil. Sob certas circunstâncias pode ocorrer somente um dos mecanismos, mas freqüentemente os dois ocorrem juntos, mesmo em materiais convencionalmente considerados como frágeis. Modelos para cada tipo de mecanismo agindo isoladamente têm sido desenvolvidos, de forma a se entender o desgaste de abrasivo de maneira simples. Estes modelos serão abordados a seguir.

### 2.3.1 Desgaste abrasivo por deformação plástica

A FIG. 7 mostra uma partícula abrasiva, idealizada como um cone de semiângulo  $\alpha$ , sendo arrastada através de uma superfície de material dúctil que deforma sob uma carga de indentação  $W$ . A partícula desloca material formando um sulco e o desgaste ocorre pela remoção de alguma proporção deste material. A carga normal gera deformação plástica abaixo da partícula e causa uma pressão  $P$  que age na área de contato entre a partícula e a superfície. Uma vez que o cone está se movimentando e o contato ocorre na frente da superfície (HUTCHINGS, 1992), a carga normal sobre cada partícula será:

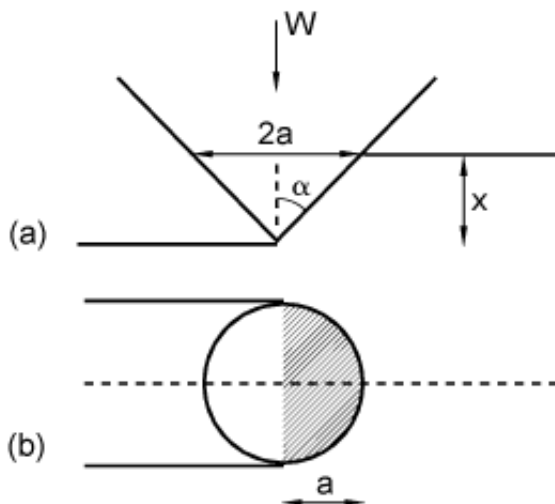


Figura 7: Geometria do contato entre uma partícula abrasiva idealizada cônica e uma superfície: (a) em elevação; (b) em vista plana (HUTCHINGS, 1992)

$$w = P \frac{\pi a^2}{2} = \frac{1}{2} P \pi x^2 \operatorname{tg}^2(\alpha) \quad (2.27)$$

O volume de material deslocado pelo cone deslizando por uma distância  $l$  sobre a superfície é aproximadamente igual a  $l \cdot a \cdot x$ , ou  $l \cdot x^2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$ . As grandezas  $a$  e  $x$  estão definidas na figura. Se uma fração  $\eta$  de material deslocado do sulco for removido como fragmento de desgaste, então o volume desgastado produzido por esta única partícula por unidade de distância,  $q$ , será dado por:

$$q = \eta x^2 \tan(\alpha) \quad (2.28)$$

Isolando  $x^2$  na equação 2.27 e substituindo na equação 2.28 obtemos:

$$q = \frac{2\eta w}{\pi P \tan(\alpha)} \quad (2.29)$$

somando as contribuições de todas as partículas abrasivas e assumindo que  $P \approx H$ , a dureza à indentação do material, podemos mostrar que o volume total removido por unidade de deslizamento,  $Q$ , é dado por:

$$Q = \frac{KW}{H} \quad (2.30)$$

onde  $W$  é a carga normal total aplicada e a constante  $K$  depende na fração  $\eta$  de material removido e da geometria da partícula abrasiva.

$$K = \frac{2\eta}{\pi \tan(\alpha)} \quad (2.31)$$

### 2.3.2 Desgaste abrasivo por fratura frágil

Fratura frágil, devido a um contato concentrado, ocorre em larga escala e pode ser compreendida em termos da distribuição de tensão elástica “Hertziana”. Para uma esfera sendo pressionada contra uma superfície plana, sob uma carga normal  $w$ , a área de contato, conforme já visto na equação 2.3, é proporcional a  $w^{2/3}$ . A tensão normal sobre a área de contato é  $w/\pi a^2$ , onde  $a$  é o raio do círculo de contato, e varia com  $w^{1/3}$ . A tensão não é uniforme sobre a área circular, mas é máxima no centro e decresce até zero nas extremidades. A tensão máxima no centro do círculo de contato é  $3/2$  vezes a tensão média (HUTCHINGS, 1992).

A tensão normal  $\sigma_1$  na superfície plana alcança um valor máximo  $\sigma_{r_{max}}$  exatamente na extremidade do círculo de contato dado por:

$$\sigma_{r_{max}} = (1 - 2\nu)p_m \quad (2.32)$$

onde  $p_m$  é a tensão normal média exercida sobre a área de contato ( $p_m = \frac{w}{\pi a^2}$ ) e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson. É esta componente de tensão normal,  $\sigma_{r_{max}}$ , que leva à fratura. Quando a carga normal chega a um valor crítico, uma trinca inicia-se e rapidamente se propaga de maneira a formar uma trinca na forma de cone, de acordo com a FIG. 8.

Se uma força tangencial for aplicada no contato, como no deslizamento, então a distribuição de tensão é modificada e a carga normal necessária para iniciar a fratura é extremamente reduzida. Sob condições de deslizamento, as trincas que se formam não



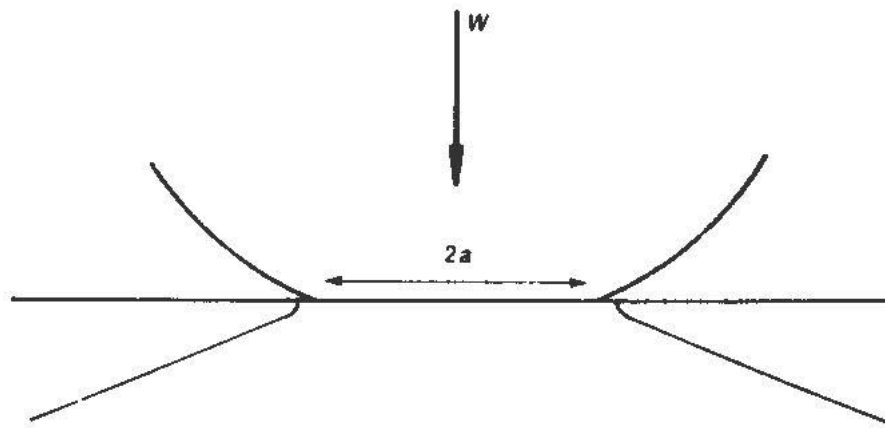


Figura 8: Geometria de uma trinca Hertziana em forma de cone formada por uma esfera carregada normalmente sobre uma superfície plana de material frágil (HUTCHINGS, 1992)

interceptam a superfície em forma de círculos, mas em uma série de arcos (FIG. 9).

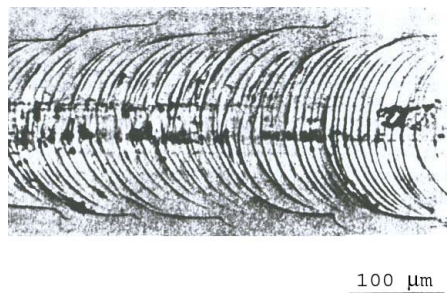


Figura 9: Série de trincas em forma de arcos causada pelo deslizamento de uma esfera sobre um sólido frágil, sob carregamento normal (HUTCHINGS, 1992)

Esses tipos de trincas não levam prontamente à remoção de material. Entretanto, se o deslizador for uma partícula dura e angular, é gerado um campo de tensões elasto-plástico e as trincas formadas, bem diferentes das trincas hertzianas geradas num campo de tensões elástico quando o indentador é cego, podem levar imediatamente ao desgaste.

Supondo um indentador de ponta perfeitamente afiada (raio de curvatura igual a zero), existiria uma singularidade de tensão no ponto de contato com a superfície do material. Estas tensões intensas (cisalhamento e compressão hidrostática) são aliviadas pela deformação plástica local. A zona de material deformado está indicada pela letra D na FIG. 10. Quando a carga no indentador atinge um valor crítico, a tensão normal inicia uma trinca média no plano vertical, indicada por M. O aumento da carga é acompanhado por progressiva extensão da trinca. Ao se reduzir a carga, a trinca se fecha, e a relaxação do material deformado ao redor da região de contato causa tensões residuais elásticas. Estas tensões residuais são responsáveis pelo aparecimento de trincas laterais que crescem com o descarregamento subsequente. Conforme o descarregamento se completa, as trincas laterais se curvam para o alto, terminando na superfície livre.

As trincas laterais se formam somente quando a carga normal no indentador excede um valor crítico,  $w^*$ . O valor de  $w^*$  depende da tenacidade à fratura do material,  $K_{Ic}$ , e da

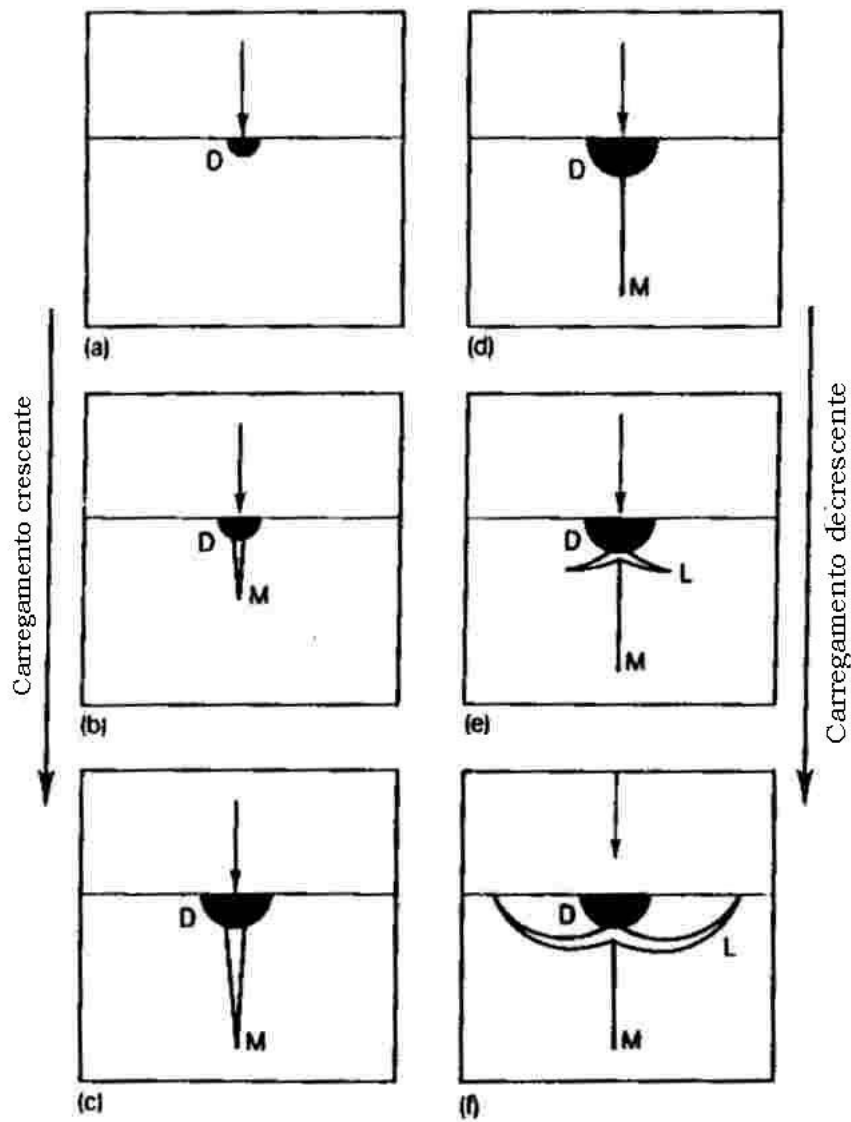


Figura 10: Diagrama mostrando a formação de trincas em um material frágil devido à indentação (HUTCHINGS, 1992)

sua dureza,  $H$ . Hutchings (1992) sugere que:

$$w^* \propto \left(\frac{K_c}{H}\right)^3 K_c \quad (2.33)$$

Quando um material é deformado ele tende a armazenar a energia internamente em seu volume. Uma vez que esta energia está associada à deformação do material ela é definida como a energia de deformação. A tenacidade é a medida da capacidade de um material absorver esta energia de deformação sem fraturar. Materiais com alta tenacidade sofrerão grandes distorções devidas a uma sobrecarga, já materiais com baixa tenacidade podem romper subitamente sem dar sinais de um rompimento eminente. Tenacidade à fratura,  $K_c$ , é a resistência à fratura na presença de uma trinca. Esta medida se faz a partir de um ensaio no qual um corpo de prova previamente trincado é submetido a um deslocamento

crescente até a sua fratura.

A razão  $H/K_c$  é uma medida útil da fragilidade. Um valor baixo deste índice de fragilidade corresponde a um alto valor de  $w^*$  e indica um material resistente à fratura por indentação.

Um modelo para o desgaste por fratura frágil é baseado na remoção de material pelo desenvolvimento de trincas laterais (HUTCHINGS, 1992). Conforme uma partícula afiada desliza sobre a superfície formando uma ranhura plástica, as trincas laterais crescem para o alto em direção à superfície livre a partir da sub-superfície deformada (FIG. 11).

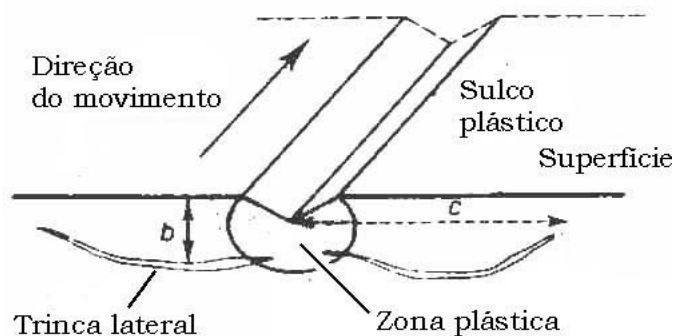


Figura 11: Ilustração esquemática da remoção em um material frágil pela extensão de uma trinca lateral sob um sulco plástico (HUTCHINGS, 1992)

Assume-se que o material seja removido em forma de lascas na região entre as trincas laterais e a superfície livre. A taxa de desgaste pode ser estimada a partir do volume desta região. A extensão lateral da trinca,  $c$ , é dada por:

$$c = \frac{\alpha_1 \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{3}{5}} w^{\frac{5}{8}}}{K_c^{\frac{1}{2}} H^{\frac{1}{8}}} \quad (2.34)$$

onde  $w$  é a carga normal na superfície;

$E$  e  $H$  são o módulo de Young e a dureza por indentação do material, respectivamente;

$K_c$  é a tenacidade à fratura;

$\alpha_1$  é uma constante que depende da forma da partícula;

Seja a profundidade das trincas laterais,  $b$ , proporcional ao raio da zona plástica e dada por:

$$b = \alpha_2 \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{w}{H}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.35)$$

onde  $\alpha_2$  é uma constante geométrica.

Um limite superior para o volume removido por partícula, por unidade de distância de deslizamento, é  $2bc$ . Se existirem  $N$  partículas em contato com a superfície, cada uma sob a mesma carga  $w$ , então a taxa de volume desgastado, por unidade de deslizamento, devido a todas as partículas,  $Q$ , será:

$$Q = \alpha_3 \frac{N \left( \frac{E}{H} \right) w^{\frac{9}{8}}}{K_c^{\frac{1}{2}} H^{\frac{5}{8}}} \quad (2.36)$$

onde  $\alpha_3$  é uma constante geométrica.

Outras análises do mesmo modelo (HUTCHINGS, 1992) levam a resultados significativamente diferentes, uma vez que são usados métodos alternativos para o cálculo de  $b$  e  $c$ . Uma destas aproximações resulta em:

$$Q = \alpha_4 \frac{N w^{\frac{5}{4}}}{K_c^{\frac{3}{4}} H^{\frac{1}{2}}} \quad (2.37)$$

onde  $\alpha_4$  é uma constante. Neste caso  $Q$  não depende de  $E$ .

As conseqüências práticas das duas equações são similares, uma vez que razão  $E/H$  não varia muito entre os sólidos frágeis. As duas equações predizem que a taxa de desgaste é inversamente proporcional tanto à dureza quanto à tenacidade num expoente de aproximadamente  $1/2$ .

Uma característica importante destas equações é que, em ambos os casos, o expoente de  $w$ , a carga normal em cada partícula, é maior que 1. Significa que a taxa de desgaste por fratura lateral não é diretamente proporcional à carga, marcando uma diferença importante entre este mecanismo e aqueles envolvendo apenas deformação plástica.

Se existirem  $N$  partículas dispersas sobre uma área  $A$  da superfície, cada uma carregada com a mesma carga normal  $w$ , então a carga total aplicada,  $W$ , será  $Nw$ . Se as partículas tiverem dimensões lineares  $d$ , então  $N$  será proporcional a  $A/d^2$ . A partir da equação 2.37, segue que o volume removido por todas as partículas, por unidade de deslizamento, será dado por:

$$Q = \alpha_5 \frac{W^{\frac{5}{4}} d^{\frac{1}{2}}}{A^{\frac{1}{4}} K_c^{\frac{3}{4}} H^{\frac{1}{2}}} \quad (2.38)$$

Para um carregamento permanente  $W$  e uma área de contato aparente  $A$ , espera-se que a taxa de desgaste aumente com a raiz quadrada do tamanho da partícula.

Estes modelos sugerem que o desgaste por fratura frágil é mais crítico do que o por deformação plástica, pois neste a taxa de desgaste cresce linearmente com  $W$ , enquanto naquele a taxa cresce mais do que linearmente. Observa-se pela FIG. 11 que o volume circundado pela trinca é muito maior do que o deslocado pela ranhura plástica. Além disso, a dependência da tenacidade é mais forte do que a dependência da dureza.

## 2.4 Topografia Superficial

### 2.4.1 Análise via Perfilometria

Um dos métodos mais comuns de análise da topografia de uma superfície é a perfilometria por contato, na qual uma ponta fina é deslizada sobre a superfície e o seu deslocamento vertical é convertido em um gráfico bi-dimensional que representa um perfil desta. Com os equipamentos mais modernos, é possível fazer um grande número de perfis ao longo da superfície, deslocando levemente a ponta para a lateral ao final de cada varredura. Assim, uma superfície é interpolada através destes perfis gerando uma imagem tri-dimensional. Esta técnica denomina-se perfilometria 3D e os parâmetros de textura superficial obtidos neste caso diferem-se sensivelmente dos parâmetros bi-dimensionais, e são bem mais representativos da superfície.

O perfilômetro consiste basicamente em uma coluna, unidade transversal, braço, ponta e transdutor. A coluna é responsável pelo ajuste vertical e oblíquo do sistema sobre a superfície, enquanto que a unidade transversal, que contém o amplificador, desloca horizontalmente sobre ela. O braço, afixado na unidade transversal, suporta a ponta e converte seus deslocamentos verticais em sinais elétricos que são enviados para o transdutor. Este por sua vez amplifica e converte os sinais em informações digitais que são transferidas para um computador, onde diferentes formas de análises estatísticas serão feitas. Estes princípios de operação do perfilômetro estão ilustrados na FIG. 12. Os detalhes dos componentes do perfilômetro podem ser observados nas FIG. 13 e 14. Os dados medidos pelo perfilômetro são registrados como uma distribuição de alturas (picos e vales). Cada parâmetro se propõe a descrever um determinado aspecto da distribuição de alturas, o que faz com que sejam necessários mais de um deles para descrever uma superfície de maneira satisfatória (KNEGT, 2003).

### 2.4.2 Filtragem da superfície

Toda superfície é composta por diferentes escalas de irregularidades que podemos classificar como erro de forma, ondulação e rugosidade. O erro de forma é o desvio da superfície da forma ideal que se pretendia ter, causado, por exemplo, por uma falha no nivelamento. A rugosidade é uma irregularidade em pequena escala de uma superfície, enquanto que a ondulação é uma irregularidade de escala intermediária entre a da rugosidade e a do erro de forma.

As causas destas três características e o efeito que elas têm sobre as propriedades funcionais de uma superfície são bastante independentes e o ponto que separa uma da outra é arbitrário, ou seja, não existe uma definição absoluta do que consiste a rugosidade e quando ela se torna ondulação ou erro de forma.

Vários métodos tentam subtrair o erro de forma do perfil. Um dos métodos mecânicos é feito utilizando um braço móvel, de maneira que o perfilômetro registre apenas o movi-

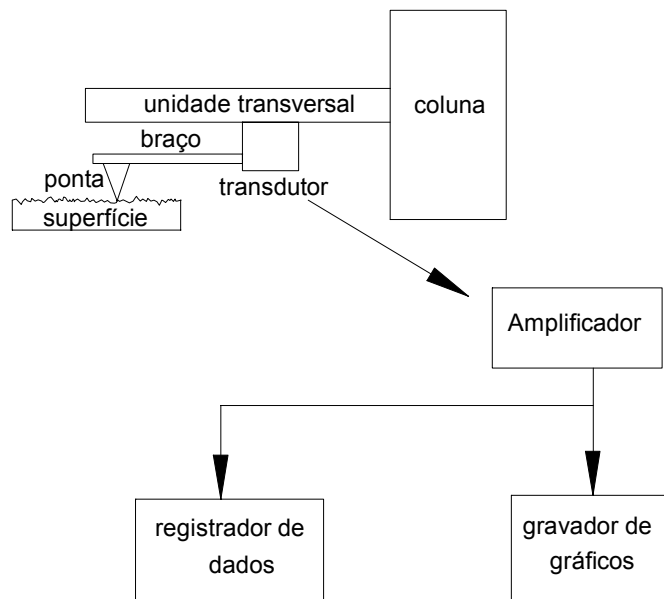


Figura 12: Princípios de operação de um perfilômetro

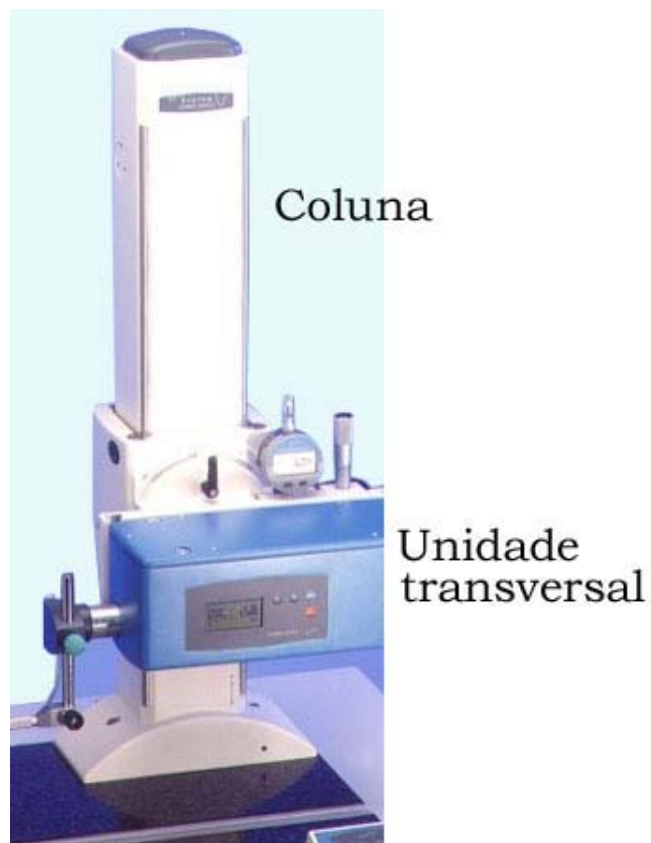


Figura 13: Detalhes da coluna e unidade transversal de um perfilômetro

mento da ponta em relação ao braço. Esta subtração pode ser feita ainda pelo próprio programa de análise através da função *remoção de forma*.

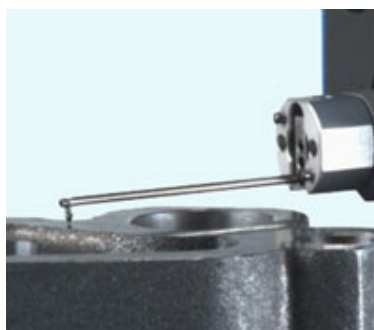


Figura 14: Detalhes do braço e ponta de um perfilômetro

Já a separação entre rugosidade e ondulação é subjetiva, e pode ser efetuada através de filtros digitais em função do comprimento de onda de corte ou filtro (“cut-off”). Hutchings (1992) recomenda que o filtro seja no mínimo 2 vezes e meia a distância entre os picos e no comprimento da amostra devem caber 5 vezes o comprimento de corte.

Escolher um filtro significa separar o perfil em dois, um no qual as irregularidades terão comprimento de onda maior que o comprimento de corte e o outro no qual as irregularidades terão comprimento de onda menor. A seleção do filtro de corte  $l_c$  (“cut-off”) utilizado neste trabalho obedece à norma DIN EM ISO 3274 : 1996 - Europe Standard for Surface Texture: profile method for contact (stylus) instruments. Na norma NBR 6405 - Rugosidade das Superfícies (para perfis 2-D), tem-se que o  $l_c$  deve ser correlacionado com o comprimento de medição  $L_m$ , que deve ser 5 vezes o comprimento de  $l_c$ . O comprimento total de medição  $L_t$  é igual a 6 vezes  $l_c$ . Para varreduras tri-dimensionais considerou-se, neste trabalho, que a área de medição deveria ser no mínimo igual a  $L_t \times L_t$ . Observa-se que  $l_c$  deve conter no mínimo 2,5 picos, pré-avaliado em uma varredura preliminar.

O efeito de se usar diferentes comprimentos de onda de corte é mostrado na FIG. 15.

## 2.5 Características físicas do esmalte dentário

O esmalte forma um revestimento protetor, de espessura variável, sobre toda a superfície da coroa dentária. Nas cúspides de molares e pré-molares humanos, o esmalte atinge uma espessura máxima de 2 a 2,5mm, tornando-se muito delgado no bordo cervical da coroa. A forma e os contornos finais das cúspides recebem sua modelação graças ao esmalte (BHASKAR, 1989).

O esmalte é composto de quase 100% de cristais de hidroxiapatita tornando-o duro e resistente ao desgaste, mas frágil, ou seja, incapaz de suportar deformação plástica antes de sua fratura. De acordo com os ensaios de nanodureza realizados por Sarikaya (2002), o esmalte apresenta dureza média de 4,46 GPa e módulo de elasticidade de 94,4 GPa. Para O’Brien (1997) o esmalte apresenta dureza Vickers de 4,08 GPa e módulo de elasticidade de 84,1 GPa. Este mesmo valor para módulo de elasticidade do esmalte é citado por Craig e Peyton (1961)

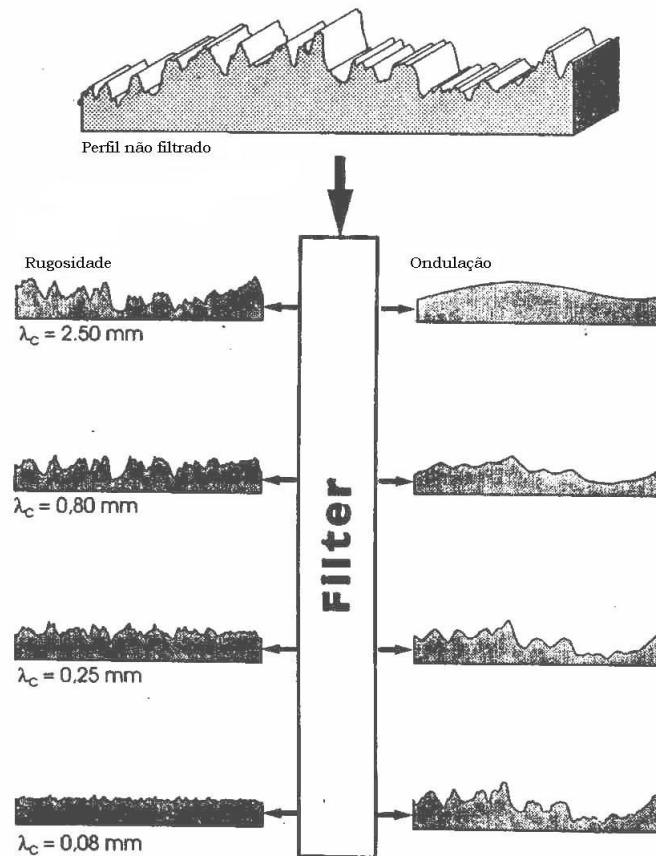


Figura 15: Exemplo do uso de diferentes comprimentos de onda de corte na separação dos perfis de ondulação e rugosidade (MUMMERY, 1992)

Os prismas de esmalte originam-se, aproximadamente, em ângulo reto com a superfície da dentina. Nas áreas cervicais e na porção central da coroa de um dente decíduo têm um curso aproximadamente horizontal. Próximos à borda incisal ou à ponta das cúspides, mudam sua direção gradualmente tornando-se oblíquos e até quase verticais nas bordas ou ponta das cúspides. O arranjo dos prismas em dentes permanentes é semelhante nos dois terços oclusais da coroa. Na região cervical, no entanto, desviam-se de um trajeto horizontal para um apical (FIG. 16) (BHASKAR, 1989).

Os prismas direcionam-se para as superfícies externa e oclusal do dente e formam um ângulo obtuso com as mesmas exceto nas pontas das cúspides e nos cantos das arestas interproximais.

A extremidade dos prismas apresenta-se côncava e varia em forma e profundidade. São mais rasas nas regiões cervicais e mais profundas nas cúspides e bordas incisais (BHASKAR, 1989).



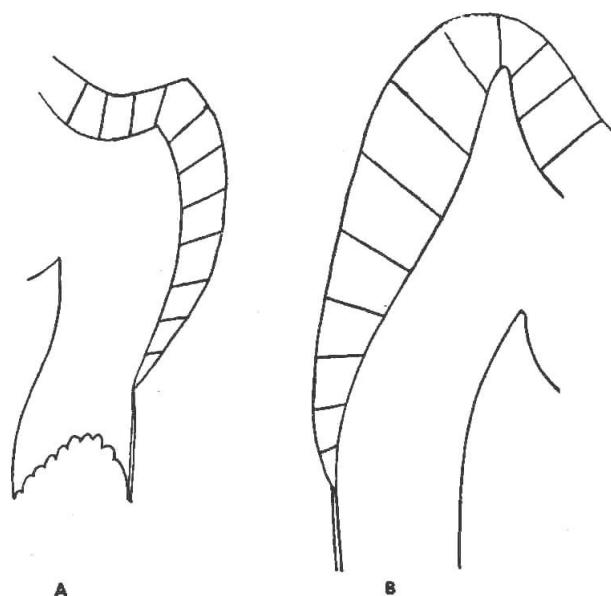


Figura 16: Esquema indicando a orientação geral dos prismas de esmalte na coroa dentária. **A** - dente decíduo. **B** - dente permanente (BHASKAR, 1989)

### 2.5.1 Linhas Incrementais de Retzius

Estas linhas surgem como bandas castanhas em cortes desgastados de esmalte. Ilustram o padrão incremental do esmalte, isto é, a aposição sucessiva de camadas de esmalte durante a formação da coroa. Em cortes longitudinais elas circundam a ponta da dentina (FIG. 17 A). Nas regiões cervicais da coroa, seu trajeto é oblíquo. Desviam-se oclusalmente desde a junção amelodentinária até a superfície (FIG. 17 B). Em cortes transversais da coroa as linhas incrementais de Retzius aparecem como círculos concêntricos (FIG. 18). Podem, então, ser comparadas aos anéis de crescimento do tronco de uma árvore, quando observado em corte transversal (BHASKAR, 1989).

### 2.5.2 Estruturas de superfície

Uma camada de esmalte aprismático, de aproximadamente  $30\mu m$  de espessura e relativamente sem estrutura foi descrita em 70% dos dentes permanentes e em todos os decíduos. Este esmalte sem estrutura é encontrado menos frequentemente nas cúspides e maior número de vezes junto às áreas cervicais da coroa. Nele não são observados prismas e todos os cristais de apatita estão paralelos entre si e perpendiculares às linhas de Retzius. Esta camada também é algo mais mineralizada do que o grosso do esmalte sob ela (FIG. 19).

Outros detalhes microscópicos também observados nas superfícies mais externas do esmalte de dentes recém-erupcionados são as periquimácias, a extremidade dos prismas e lamelas (no sentido de trincas) (BHASKAR, 1989).

As periquimácias são sulcos ondulados, transversais ao longo do eixo da coroa. Acredita-se

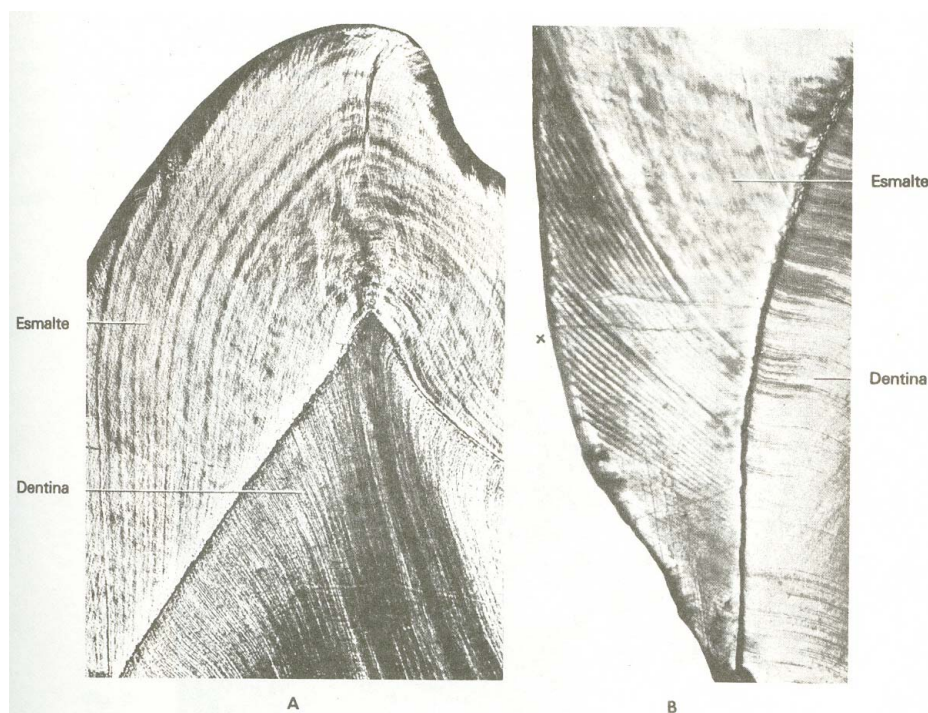


Figura 17: Linhas incrementais de Retzius em lamelas longitudinais desgastadas. **A**, região de cúspide. **B**, região cervical (BHASKAR, 1989)



Figura 18: Linhas incrementais de Retzius em lamela transversal de dente desgastado; arranjo concêntrico (BHASKAR, 1989)

que elas refletem as linhas de Retzius na superfície. São contínuas em torno da coroa, usualmente paralelas entre si e à junção do cemento com o esmalte. Nesta região encontram-se cerca de 30 periquimácias por milímetro e sua concentração diminui gradualmente para 10 por milímetro próximo à borda incisal ou oclusal. Usualmente seu curso é bastante regular, porém na região cervical pode se mostrar bastante irregular (BHASKAR, 1989).

Com o avanço da idade há uma perda progressiva das estruturas superficiais. A FIG. 20 mostra a superfície de um dente recentemente erupcionado no qual se vê a porção terminal pronunciada dos prismas do esmalte e periquimácias. Na FIG. 21 observa-se o estágio inicial da perda estrutural que ocorre durante os primeiros anos. Na FIG. 22



Figura 19: Microrradiografia de lamela desgastada de esmalte humano. A camada superficial (seta) relativamente sem estrutura é mais radiopaca do que o corpo de esmalte abaixo dela (aproximadamente x200) (BHASKAR, 1989)

tem-se um estágio mais adiantado onde as porções mais elevadas entre as periquimácias foram desgastadas, enquanto os detalhes estruturais no fundo dos sulcos ainda estão mais ou menos preservados. Com o tempo o desgaste progride até o desaparecimento das periquimácias e extremidades dos prismas. Uma vez que trata-se de réplicas negativas, os detalhes de superfície parecem invertidos. As estruturas elevadas são, na verdade, depressões. A FIG. 23 mostra a superfície desgastada até tornar-se lisa. Visualizam-se trincas que representam, na realidade, a borda externa das lamelas. Todos os aumentos são de 105 vezes.

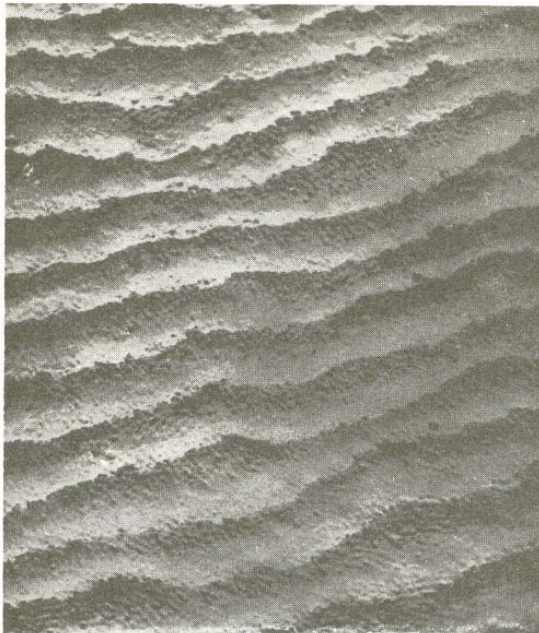


Figura 20: Paciente de 12 anos de idade (BHASKAR, 1989)



Figura 21: Paciente de 25 anos de idade (BHASKAR, 1989)



Figura 22: Paciente de 52 anos de idade - réplica negativa (BHASKAR, 1989)

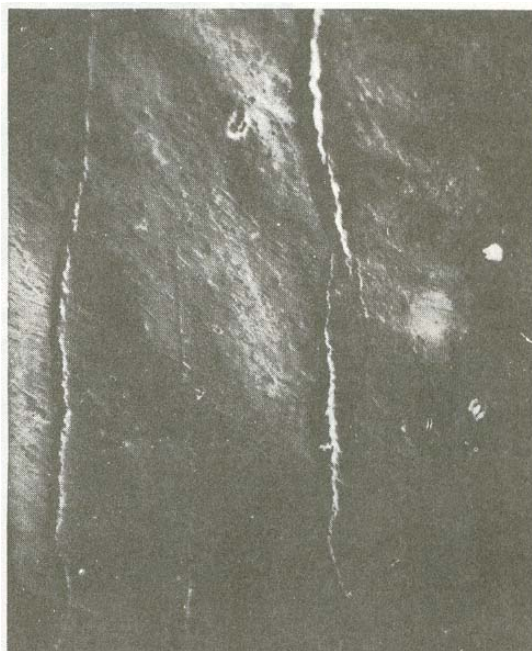


Figura 23: Superfície desgastada até tornar-se lisa (BHASKAR, 1989)

## 2.6 Desgaste dentário

O desgaste é definido como sendo a remoção de material resultante da interação mecânica entre duas superfícies sólidas devido ao seu movimento relativo (SHORTALL, 2002). O desgaste dentário é um processo complexo que depende de fatores externos tais como função mastigatória, tipo de comida ingerida, período e seqüência de erupção dentária, forma do dente e posição do dente relativo à arcada como um todo (CARLSSON; JOHANSSON; LUNDQVIST, 1985). Também podem estar envolvidos fatores intrínsecos tais como diferenças na espessura de esmalte e dureza (MURPHY, 1959; LAVELLE, 1970). As taxas de desgaste podem depender também da direção do fator abrasivo em relação à direção estrutural e orientação dos prismas (BOYDE, 1970; POWERS; CRAIG; LUDEMA, 1973).

Desgaste incisivo e oclusal dos dentes é um processo fisiológico que ocorre durante toda a vida (BERRY, 1975; SMITH, 1989). Em contraste com as gerações passadas, que experimentavam pronunciado desgaste em todos os dentes, as pessoas urbanas, atualmente, exibem maior desgaste nos dentes anteriores (CARLSSON; JOHANSSON; LUNDQVIST, 1985; DAHL; FLOYSTRAND; KARLSEN, 1985), apresentando dois tipos de facetas de desgaste, horizontal e vertical. As facetas horizontais estão localizadas nas bordas incisivas e nas pontas das cúspides, enquanto que as facetas verticais localizam-se na superfície palatina dos dentes superiores. e labialmente nos dentes inferiores. Jankelson (1955) sugeriu que facetas verticais são formadas predominantemente pela mastigação, enquanto que as facetas horizontais são típicas de bruxismo.

O desgaste dos dentes é irreversível e a perda da substância não pode ser recuperada (NYSTRÖM, 1990). Assim, o desgaste do dente permanente é cumulativo, mas a taxa

que ocorre pode variar durante diferentes períodos da vida (SMITH, 1989). Tem sido sugerido que desgaste atípico ou maior do que o normal seja causado por parafunção (LINDQVIST, 1971; XHONGA, 1977), oclusão morfológica desbalanceada (RICKETTS, 1969; MILICIC; GAZI-COKLICA; SLAJ, 1987), distúrbios digestivos (SMITH, 1989) e pela combinação destes (CARLSSON; JOHANSSON; LUNDQVIST, 1985). Associações entre desgaste dentário e constituição psicológica têm sido relatadas (PÖLLMANN; BERGER; PÖLLMANN, 1987). É devido a esta série de possíveis causas que um estudo de desgaste dentário seja de difícil interpretação.

De acordo com Oh, DeLong e Anusavice (2002), desgaste excessivo resulta em um dano inaceitável para as superfícies oclusais e alterações do padrão funcional do movimento mastigatório. Pode também destruir a estrutura do dente anterior que é essencial para a “função de guia” ou para a estética, resultando em um aumento das “tensões horizontais” no sistema mastigatório associada à “remodelagem” da articulação temporo mandibular (ATM).

### 2.6.1 **Bruxismo**

Uma das causas mais comuns do desgaste excessivo dos dentes é o bruxismo, hábito parafuncional de ranger ou apertar os dentes. O bruxismo é considerado uma patologia de ocorrência comum (GLAROS, 1981; MOHL, 1991; NADLER, 1957; OKESON, 1992, 1994; PAVONE, 1985), podendo ser observado em todas as faixas etárias (NADLER, 1957), com prevalência semelhante em ambos os sexos (GLAROS, 1981; MOHL, 1991). Estudos demonstram que o bruxismo é uma das desordens funcionais dentárias mais comuns, complexas e destrutivas existentes (COLQUITT, 1987; PAVONE, 1985), podendo ter uma origem tão antiga quanto a do próprio homem (NADLER, 1957). É ainda uma desordem multifatorial que pode estar ligada à tensão emocional, ao medo, frustração ou interferências oclusais.

Embora sua etiologia seja multifatorial (CASH, 1988), o bruxismo pode ser uma resposta fisiológica às interferências de oclusão causadas pela erupção de dentes permanentes. Cash (1988) observou em seu artigo de revisão que o bruxismo em crianças geralmente aumenta com a idade durante o período de dentição mista e então diminui. Em um estudo que relaciona vários fatores (bruxismo, escovação horizontal, consumo de sucos ácidos, álcool ou fumo) com o desenvolvimento de lesões cervicais dentárias, apenas bruxismo mostrou uma forte correlação positiva (GRIPPO; SIMRING, 1995).

O padrão de desgaste dental do bruxismo prolongado é, freqüentemente, não muito uniforme e comumente mais severo nos dentes anteriores do que nos posteriores na dentição natural (ARITA, 1990; ARNOLD, 1981). Em pacientes portadores de prótese dentária total pode ocorrer o inverso, pois a estabilidade da dentadura permite pressões maiores nas regiões posteriores (ARITA, 1990). Quando relacionado ao sono, o bruxismo envolve movimentos rítmicos semelhantes ao da mastigação e longos períodos de contração dos músculos mandibulares (ARNOLD, 1981; MOHL, 1991; PETERS; GROSS, 1995). Essas contrações, comumente bilaterais, envolvem forças máximas de contração (MOHL, 1991;

PETERS; GROSS, 1995), as quais, em determinados momentos, podem superar aquelas realizadas durante o esforço consciente (ATTANASIO, 1991; OKESON, 1992), com duração suficiente para produzir fadiga e dor muscular (MOHL, 1991). Todavia, a frequência e a duração do bruxismo necessárias para desencadear sintomatologia muscular ainda não foram estabelecidas (OKESON, 1992).

### 2.6.2 Avaliação de desgaste dentário

No estudo de Lambrechts (1989) e seu grupo o desgaste por atrição (abrasão) também denominado de desgaste da área de contato oclusal de esmalte humano foi medido através de uma técnica tri-dimensional computadorizada durante um período de 4 anos. Vinte e um indivíduos apresentando dentição completa e oclusão normal foram selecionados para a confecção de réplicas de dentes pré-molares e molares. Foram feitas impressões em silicone destes dentes e a partir destas impressões moldaram-se réplicas positivas em cobre. A técnica de confecção das réplicas foi descrita em detalhes por Lambrechts, Vanherle e Davidson (1981). As réplicas eram observadas através de um microscópio (Leitz, Wetzlar Germany, GmbH) que gerava suas imagens tri-dimensionais computadorizadas. Três pontos tomados em cada réplica formavam o plano de referência comum para que, através da sobreposição de imagens, a medida da perda vertical de material dos subsequentes modelos fosse obtida. Uma descrição mais detalhada deste procedimento foi descrita por Lambrechts (1984). Após 4 anos a perda total média de esmalte foi de  $153\mu m$  para os molares e  $88\mu m$  para os pré-molares.

Pintado (1997) e seu grupo realizaram um trabalho bastante semelhante ao de Lambrechts (1989), onde também se utilizaram réplicas de dentes para a medição do desgaste dentário. Entretanto, a técnica de avaliação das réplicas foi feita através de um sistema de perfilometria de contato que gerava imagens digitais das mesmas. Este sistema foi descrito por DeLong, Pintado e Douglas (1985) e Pintado, Conry e Clark (1988). Neste trabalho foram selecionados 18 indivíduos apresentando dentição completa e oclusão normal para a confecção de réplicas de seus dentes caninos mandibulares e maxilares, segundos pré-molares e o primeiro molar. As réplicas foram refeitas após 1 ano e após 2 anos da data base. A superposição das imagens digitalizadas possibilitaram a medida da taxa permanente de desgaste anual, encontrando uma perda volumétrica média, de todos os dentes, de  $0,04\mu m^3$  e uma perda média de profundidade  $10,7\mu m$ .

Infelizmente estes métodos de detecção de desgaste requereram um tempo longo de estudo e não supriram as explicações de quais os mecanismos de desgaste estavam envolvidos.

Teaford e Tylanda (1991) sugeriram que mudanças microscópicas no padrão de desgaste em dentes humanos poderiam ser detectados em questão de dias usando microscópio eletrônico de varredura e poderiam ser usadas como indicadores das taxas de desgaste. Entretanto, embora o desgaste pudesse ser detectado não se podia avaliar os mecanismos responsáveis pelas mudanças.

Sabe-se que uma superfície pode ter seu perfil alterado por desgaste, sendo a modificação

dependente do(s) mecanismo(s) de desgaste que estiver em ação. Reciprocamente, uma vez que o perfil da superfície afeta a área real de contato, a taxa de desgaste também depende da topografia. Desta forma, Whitehead (1997) e seu grupo sugerem que a necessidade de uma metodologia para quantificar o desgaste em dentes pode ser suprida por uma combinação de perfilometria com a escolha cuidadosa dos parâmetros de descrição da textura superficial.

Wassel, McCabe e Walls (1994a) criaram um teste de desgaste envolvendo dois corpos, combinando normalmente o esmalte dentário com algum tipo de material restaurador. Este teste, que pode ser aplicado em uma máquina de desgaste universal, está descrito em outro trabalho dos autores Wassel, McCabe e Walls (1994b). Uma vez que o esmalte dentário mostra-se inadequado para a padronização do ensaio, devido às diferenças na sua morfologia, composição e microestrutura, os autores buscaram por um material de mesmo aspecto que o substituísse. Escolheram a cerâmica “Steatite” por apresentar dureza vickers semelhante ao esmalte. Para compará-los, foram realizados testes de desgaste com cada um, combinados a outros materiais restauradores, e constatou-se que ambos apresentaram resultados próximos quanto às taxas de desgaste e coeficiente de atrito. Após os testes as superfícies dos materiais foram analisadas por perfilometria a laser e por MEV. Estas análises puderam elucidar os principais mecanismos de desgaste atuantes e ainda demonstraram que estes foram de mesma natureza para os dois materiais.

Em um estudo de mudança de textura superficial devido a corrosão em dentes, West (1998) e seu grupo produziram amostras planas de esmalte através do polimento de dentes do siso não erupcionados. Cada amostra foi fixada a um utensílio de acrílico, semelhante a um aparelho ortodôntico, e este utensílio foi adaptado à boca de um paciente. O paciente ingeriu, através de pequenos goles, suco de laranja durante 10 min, 4 vezes ao dia, durante 15 dias. As amostras foram retiradas dos aparelhos e ensaiadas por perfilometria bidimensional ao final de cada dia de estudo. Os perfis foram comparados com o perfil de referência, obtido para a amostra recém-preparada, através de uma superposição de imagens e o ganho ou a perda de altura foram calculados. Um outro grupo de amostras foram submetidas à mesma investigação em laboratório, sem a presença de saliva. Neste caso elas eram submersas em bebida por 10min, 4 vezes ao dia, durante 15 dias e armazenadas em solução salina isotônica durante os intervalos. Desta forma, West (1998) e seu grupo confirmaram o potencial corrosivo do suco de laranja e sugeriram que a técnica de perfilometria pudesse ter inúmeras aplicações para este tipo de estudo sob condições altamente controladas e sobre períodos de tempo realísticos.

A técnica desenvolvida na Universidade de Minnesota (PETERS, 1999) consiste em um sistema de perfilometria que pode medir mudanças na textura superficial com uma precisão de  $7\mu\text{m}$  para ângulos de superfície menores do que  $60^\circ$ . Réplicas precisas da superfície são feitas usando materiais de impressão de silicona de adição para formar a imagem negativa da superfície e “Epóxi-Die®” para fazer as réplicas positivas. Imagens digitais das réplicas de epóxi são feitas via perfilometria. Mudanças na superfície são identificadas e medidas por comparação entre as imagens “antes” e “depois” do desgaste, usando o “software” computacional “AnSur” (copyrights, Regents of the University of Minnesota).

De acordo com Peters (1999), para medir precisamente o desgaste *in vivo*, é necessário o uso de réplicas antes e depois do desgaste. De modo a assegurar dados confiáveis, é vital garantir que o processo de réplica reproduza a rugosidade na mesma escala em que o desgaste ocorre. Por exemplo, se estamos avaliando as mudanças microscópicas ocorridas na topografia superficial, uma réplica que reproduza apenas na escala de ondulação não é eficiente. A descrição e avaliação dos parâmetros que influenciam os processos de réplicas podem ser encontrado nos artigos de DeLong, Pintado e Douglas (1994) e Lee (1995).

Numerosos estudos (SCOTT, 1982; ROSE, 1983; BEYNON, 1954) têm mostrado que essas técnicas de réplicas podem mostrar com precisão detalhes menores do que  $1\mu m$ . As réplicas também podem ser utilizadas para análise via Microscópio Eletrônico de Varredura.

Também em um estudo de mudança de textura superficial devido a corrosão em dentes, Whitehead (1997) e seu grupo utilizaram a técnica de perfilometria bi-dimensional aplicada às réplicas de dentes incisivos de vinte e dois adultos. Foram selecionaram os parâmetros de rugosidade média e outros derivados da curva de material, cujas descrições podem ser encontradas nas seções 3.4.1 e 3.4.4, respectivamente. As réplicas de “Araldite®” selecionadas foram cobertas por, pelo menos, 20nm de ouro e foram visualizadas com aumentos de 25 a 2000 vezes. Desta forma, eles puderam verificar que os vales de periquimácias não eram lisos e continham inúmeras imperfeições e vários poros. Puderam concluir que o efeito da corrosão não é uniforme e depende de vários fatores e que a técnica de perfilometria pode ajudar a entender os mecanismos envolvidos na mudança da textura superficial do esmalte dentário.



## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Introdução

Para um estudo dos mecanismos de desgaste, o ideal é que se avalie a superfície antes e depois de sofrer a solitação. Entretanto, num trabalho *in vitro*, dispondo de dentes extraídos, seria extremamente difícil impor um desgaste simulando o mesmo padrão de forças e movimentos envolvidos no bruxismo. Além disso, no ambiente bucal o dente está sujeito a vários tipos de desgaste, por exemplo, o desgaste químico, diretamente ligado à dieta alimentar e à qualidade da saliva. Para isolar o mecanismo de desgaste atuante no bruxismo, optou-se por avaliar, no mesmo dente, duas áreas distintas. Imaginou-se que, se ambas foram constituídas da mesma natureza física e pertenceram ao mesmo ambiente, sujeitas ao mesmo nível de corrosão, o fator diferencial entre elas se dá, predominantemente, pelo desgaste abrasivo.

Para cada amostra selecionou-se duas áreas, uma aparentemente livre de desgaste e a outra com faceta típica de bruxismo. Estas áreas foram avaliadas e comparadas via perfilometria e microscopia eletrônica de varredura.

Numa segunda etapa, tentou-se estabelecer uma metodologia de avaliação de desgaste *in vivo* através da utilização de réplicas da arcada dentária. Estas réplicas deveriam copiar a topografia superficial do dente. Seria possível, assim, avaliar a mesma área antes e depois do desgaste, refazendo as réplicas do mesmo indivíduo, após um certo período de tempo. Para o sucesso desta metodologia, necessita-se primeiramente avaliar a precisão da réplica, ou seja, em que nível ela copia a rugosidade do dente. Para isso, foram feitas réplicas de dois dentes extraídos. Tanto as réplicas quanto os dentes foram analisados e comparados por perfilometria.

Numa última etapa, mediu-se por perfilometria um dente terceiro molar, recém extraído, que estava semi-incluso, porém livre de contato oclusal. Pretendia-se com isso caracterizar a superfície de um dente que não fora sujeito a desgaste abrasivo.

### 3.2 Amostras

Para avaliação do desgaste *in vitro* foram utilizados como amostras três dentes extraídos de funções diferentes na mastigação: um canino, um pré-molar e um molar. Estes dentes

foram obtidos na clínica da Faculdade de Odontologia da UFMG, com o consentimento do Comitê de Ética da UFMG. Para avaliação da precisão de réplicas foram selecionados dois dentes pré-molares. Para caracterização da topografia superficial de um dente livre de desgaste, foi utilizado um terceiro molar, recém extraído, que estava semi-incluído. A seleção das áreas de amostragem foram feitas tendo em vista as limitações da técnica de perfilometria, em função da forma e tamanho das mesmas, lembrando que as áreas deveriam ser as mais planas e maiores possíveis.

### 3.2.1 Canino

O canino é um dente com forma pontiaguda cuja função principal é a de dilacerar os alimentos mais fibrosos e resistentes. Também podem ser utilizados no corte de objetos, além de participar como guia para o movimento mandibular de lateralidade. A anatomia deste dente está ilustrada na FIG. 24.

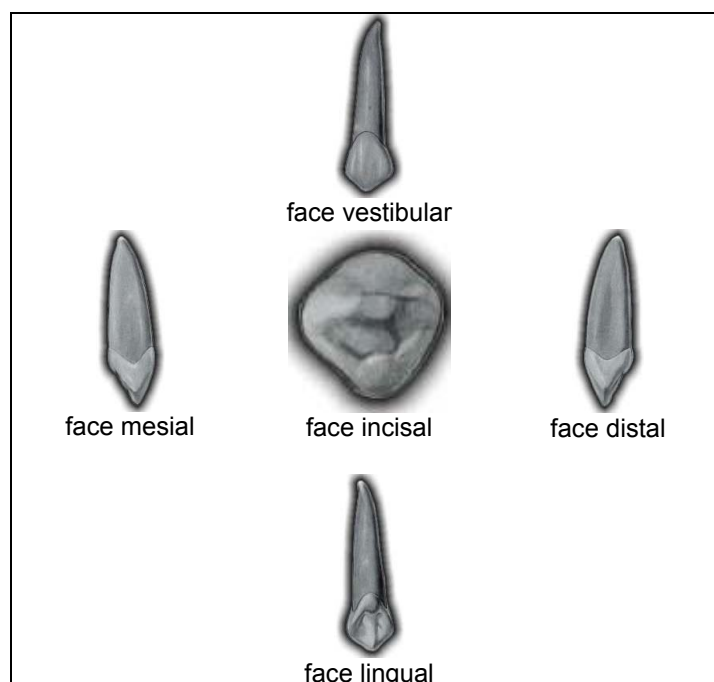


Figura 24: Faces do canino (CARVALHO, 2004)

As áreas investigadas neste dente foram a face incisal, onde encontrava-se uma faceta de desgaste horizontal, e a face vestibular considerada livre de desgaste abrasivo. Estas áreas estão representadas pela FIG.25.

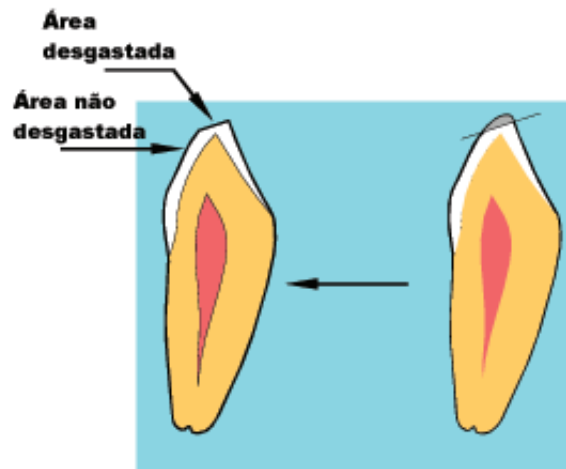


Figura 25: Esquema ilustrando a seleção de áreas para avaliação do canino

### 3.2.2 Pré-molar

O pré-molar tem duas ou três pontas aguçadas na superfície oclusal e possui tanto a função de dilacerar os alimentos quanto de triturá-los. A anatomia deste dente está ilustrada na FIG. 26.

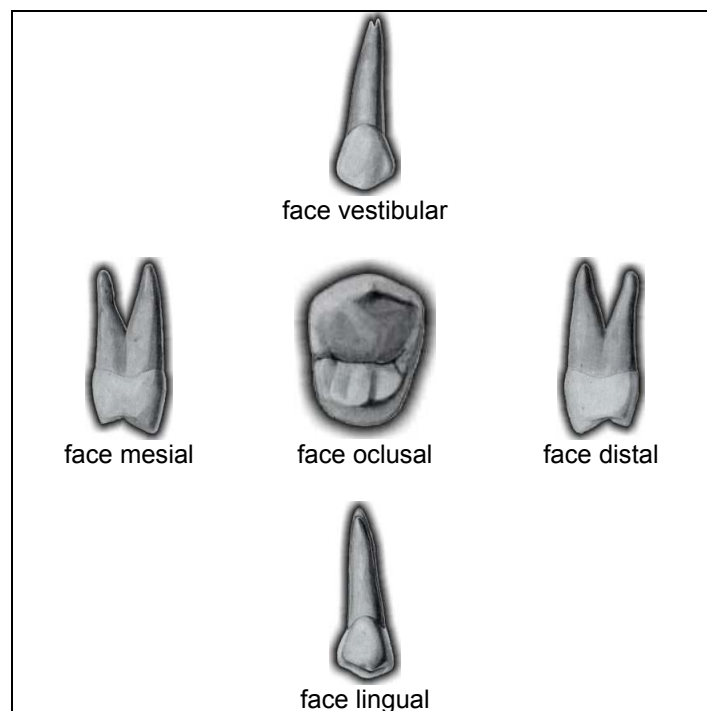


Figura 26: Faces do pré-molar (CARVALHO, 2004)

As áreas investigadas foram as faces vestibular, considerada livre de desgaste, e oclusal apresentando faceta de desgaste, conforme ilustra a FIG. 27.



Figura 27: Esquema ilustrando a seleção de áreas para avaliação do pré-molar e molar

### 3.2.3 Molar

A principal função do molar é a trituração dos alimentos. Este dente tem de quatro a cinco cúspides na superfície oclusal ou mastigatória e sua anatomia está ilustrada na FIG. 28.

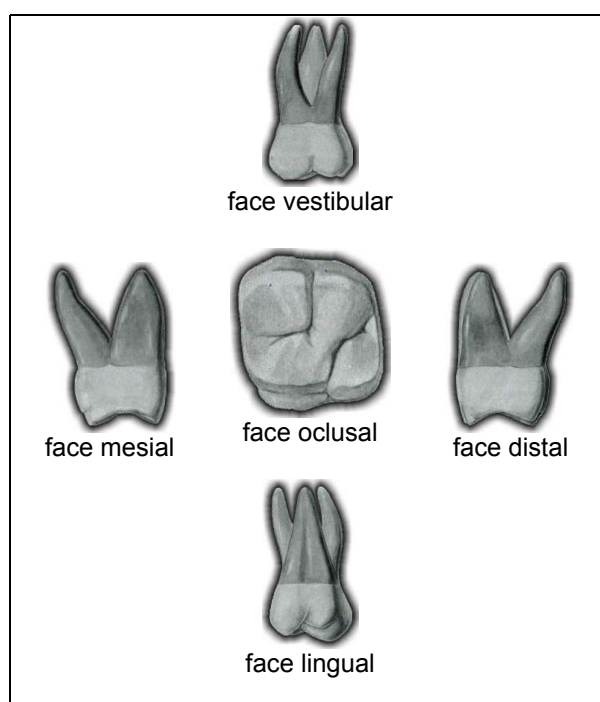


Figura 28: Faces do molar (CARVALHO, 2004)

Também foram investigadas as faces vestibular e oclusal em esquema similar ao pré-molar, conforme ilustra a FIG. 27.

### 3.2.4 Terceiro Molar

Para o 3º molar (anatomia semelhante à da FIG. 28) a face investigada foi a vestibular.

### 3.2.5 Réplicas

Os dentes para os quais foram feitas as réplicas, dois pré-molares, após extraídos foram armazenados durante 24 horas em solução de glutaraldeído para sua esterilização. Em seguida foram mantidos em congelador para evitar a sua desidratação até o momento de se prosseguir com a técnica. Foram então montados numa plataforma de gesso tipo pedra para facilitar a moldagem (FIG. 29).



Figura 29: Plataforma de gesso tipo pedra com dentes

Para a moldagem utilizou-se silicona de adição (President ®), que, após preparada, foi colocada em uma moldeira de metal perfurada. A plataforma de gesso com os dentes foi, então, pressionada contra a silicona (FIG. 30). Aguardou-se 6 minutos para que o material atingisse a presa necessária. Em seguida separou-se a plataforma da moldeira, obtendo com a impressão na silicona a réplica negativa (FIG. 31 e 32).

Para obter a réplica positiva preencheu-se a negativa com resina Epóxi (Brascola ®), aguardou-se 2 horas para a fase de presa e destacou-se a resina da moldeira (FIG. 33).



Figura 30: Plataforma pressionada contra a silicona na moldeira



Figura 31: Plataforma separada da moldeira



Figura 32: Réplica negativa dos dentes

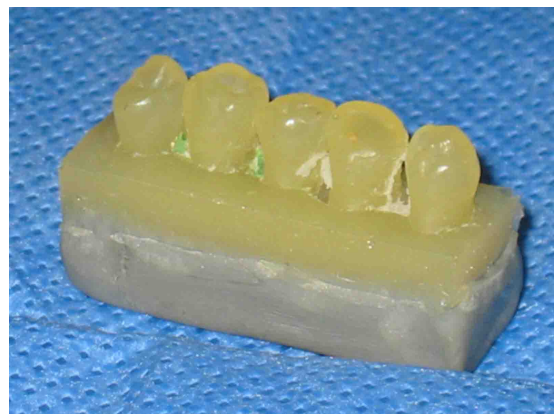


Figura 33: Réplica positiva dos dentes

## 3.3 Perfilometria

### 3.3.1 Equipamento

O equipamento é um Hommel Tester T4000 da Hommelwerke GmbH, semelhante ao da FIG. 34. Utilizou-se ponta móvel TK600 de modo a subtrair a forma arredondada do dente, resultando no perfil de rugosidade.



Figura 34: Perfilômetro

### 3.3.2 Medições

Após a medição, os dados da topografia são enviados para o computador e analisados através do software MountainsMap Universal. O procedimento de análise segue as seguintes etapas: aumento da resolução de imagem, seleção de área de amostragem, remoção de forma, filtragem, ajuste da curva de material (“threshold”), e seleção de parâmetros.

A seleção de área de amostragem é feita para que as áreas a serem comparadas tenham as mesmas dimensões. Para todas as amostras, foram selecionadas áreas de 1,5 x 1,5 mm, exceto para o molar, pois a face oclusal deste dente apresenta muitas cúspides, impedindo que a ponta atravessasse uma área maior. Neste caso a área de amostragem foi de 0,3 x 0,48mm.

A remoção de forma polinomial de ordem 2 foi feita para todas as amostras, visando eliminar do perfil a curvatura do dente.

Para cada amostra foi escolhido o filtro que separaria os perfis de rugosidade e ondulação. Para as amostras de área de 1,5 x 1,5 mm utilizou-se filtro  $\lambda_c$  de 0,25 mm, enquanto que para o molar o filtro foi de 0,05 mm.

Após a obtenção do perfil de rugosidade foi realizado o “thresholding”. Esta operação visa eliminar irregularidades isoladas do perfil. Isto se faz porque um pico isolado de altura muito maior do que a média, quando em contato, facilmente ruirá, ou seja, não contribui

para a resistência ao desgaste do material. O mesmo se pode dizer em relação aos vales, visto que um vale isolado não contribui sensivelmente para o aumento da lubrificação da superfície.

Em seguida, foram extraídos os parâmetros de textura superficial da superfície.

## 3.4 Parâmetros de textura superficial

A avaliação da topografia de uma superfície não implica apenas na medição dos perfis e sim na atribuição de um valor numérico que dê ao usuário informações universalmente aceitáveis e significantes sobre ela. A seleção dos parâmetros de superfície deve ser feita tendo-se em mente que eles devem refletir a diferença entre duas superfícies distintas e ser sensíveis às propriedades em estudo, como por exemplo, em relação ao desgaste.

As características da própria superfície, bem como as condições externas de escolha do filtro, seleção do intervalo de medição e área de amostragem podem influenciar os resultados. Assim, os parâmetros só têm significado quando as condições de medida forem especificadas.

Em 1993, no II Workshop em Caracterização de Superfícies em 3-D (STOUT, 1993), foi proposto a normalização de 14 parâmetros que descrevem os aspectos mais importantes de uma topografia: 4 parâmetros para descrição de propriedades de amplitude e distribuição de alturas, 4 parâmetros para descrição de propriedades espaciais, 3 parâmetros para descrição de propriedades híbridas (de amplitude e espacial) e 3 parâmetros para descrição de algumas propriedades funcionais. O trabalho aqui desenvolvido adotou alguns destes parâmetros para a descrição da topografia do esmalte dentário.

A seguir são apresentados os parâmetros selecionados para análise e seus significados.

### 3.4.1 Parâmetros de amplitude

***S<sub>a</sub>* ( $\mu\text{m}$ ):** rugosidade média. É um parâmetro de dispersão definido como a média aritmética dos valores absolutos da superfície acima e abaixo do plano médio.

***S<sub>q</sub>* ( $\mu\text{m}$ ):** desvio médio quadrático, ou desvio padrão da superfície. É um parâmetro mais sensível a valores extremos do que o *S<sub>a</sub>*.

Apesar de serem usados comumente em muitas aplicações práticas, os parâmetros *S<sub>a</sub>* e *S<sub>q</sub>*, principalmente por não distinguirem entre picos e vales, não caracterizam bem uma superfície. As FIG. 35 e 36 mostram perfis claramente diferentes que possuem o mesmo valor de *S<sub>a</sub>*.



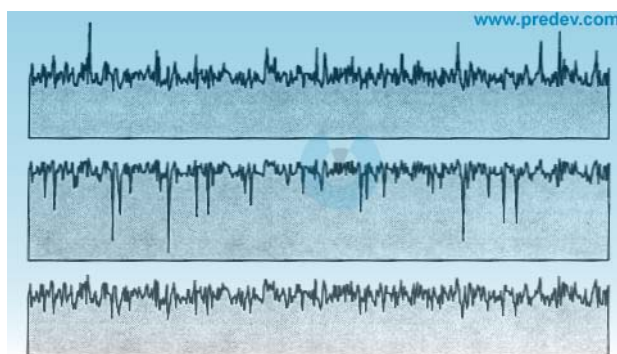


Figura 35: Primeiro exemplo de perfis diferentes com o mesmo valor de  $S_a$  (PRECISION DEVICES, INC., 2004)

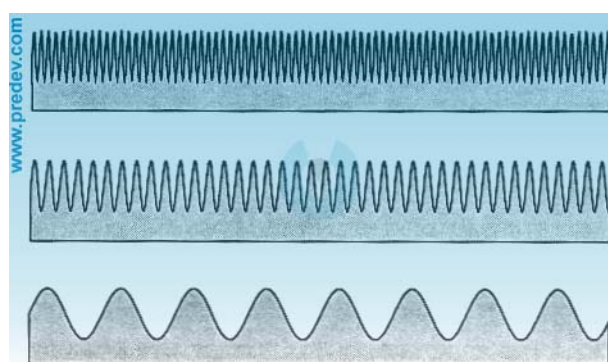


Figura 36: Segundo exemplo de perfis diferentes com o mesmo valor de  $S_a$  (PRECISION DEVICES, INC., 2004)

### 3.4.2 Parâmetros de espaçamento

$S_{ds}$  ( $p/mm^2$ ): Número de picos por unidade de área. O problema em se determinar  $S_{ds}$  consiste em como se define um pico. Para se realizar uma contagem de picos, condições devem ser impostas de modo a identificar os mais significantes picos e excluir os menos significantes. Esta condição pode ser, por exemplo, o fato de se contar um pico a cada vez que o perfil ultrapassa um nível superior estabelecido e em seguida passa abaixo de um nível inferior estabelecido. Estes níveis são, no entanto, dependentes da escolha do operador, o que torna difícil a comparação entre diferentes superfícies. Através de outra definição, o pico poderia ser relacionado com as 4 ou 8 áreas vizinhas, entretanto seria dependente do tamanho da área escolhida pelo operador. Para obter uma definição objetiva, os softwares atualmente utilizam algoritmos que calculam o tamanho dessas áreas vizinhas através de funções de autocorrelação.

Autocorrelação de uma superfície é a técnica de comparar diferentes partes do mesmo perfil, conseguindo desta forma detectar similaridades ou repetição de certas características. Se uma superfície for randômica ou isotrópica, dois segmentos do perfil não podem ser idênticos e a autocorrelação será baixa. Já para uma superfície periódica ou anisotrópica o seu perfil se repetirá a intervalos regulares e então, a autocorrelação será alta e haverá um modo de calcular o tamanho deste intervalo de correlação. Analogamente, para uma

superfície anisotrópica é possível calcular a área de correlação que é utilizada no cálculo do parâmetro  $Sds$ .

**Str**: é um parâmetro utilizado para identificar o padrão da textura de uma superfície, se ela é do tipo anisotrópica, ou seja, apresenta sulcos e cristas numa direção bem pronunciada, ou tem um aspecto uniforme. Também é calculado através de funções de autocorrelação, o que o torna um parâmetro menos sensível à escolha do operador.

Seu valor pode variar de 0 a 1. Valores altos,  $Str > 0,5$ , indicam aspecto uniforme em todas as direções, enquanto que valores baixo,  $Str < 0,3$ , indicam que as cristas tendem a seguir a mesma direção.

### 3.4.3 Parâmetros híbridos

**Sdq (mm/mm)**: inclinação média quadrática da superfície. É encontrado dividindo o perfil em pequenos segmentos e numericamente calculando a inclinação em módulo de cada segmento. A inclinação se dá pela tangente do ângulo formado entre o segmento e a direção horizontal. Quanto mais suave for a superfície, menor será o valor de Sdq (FIG. 37).

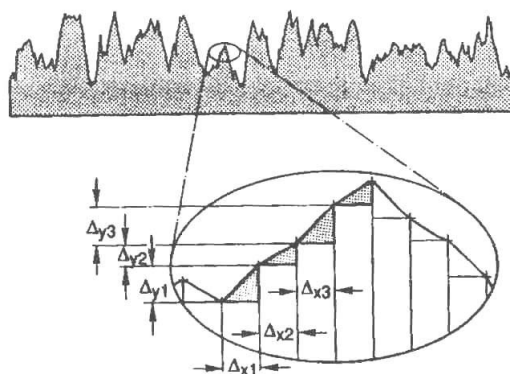


Figura 37: Cálculo da inclinação média da superfície (MUMMERY, 1992)

**Ssc (1/mm)**: curvatura média quadrática dos picos, este parâmetro só pode ser calculado após a definição dos picos. Quanto mais arredondados forem os picos, menor será o valor de Ssc.

**Sdr (%)**: taxa de aumento da área interfacial desenvolvida pela rugosidade. Diferença percentual entre a área interfacial e a área nominal de amostragem.

### 3.4.4 Parâmetros da curva Abbott-Firestone (curva de razão de área de suporte)

Uma superfície pode ser considerada como a separação entre ar e material, uma vez que acima dela encontra-se o primeiro e abaixo dela o segundo. Uma superfície perfeitamente lisa terá uma transição abrupta, enquanto que esta transição será mais gradual para uma

superfície rugosa. A profundidade de transição é a amplitude total de rugosidade. A cada profundidade existe uma razão entre as porcentagens de material e ar. Esta razão é calculada para vários níveis através do perfil e expressa graficamente como uma curva, chamada de curva Abbott-Firestone que descreve a transição de ar para material (FIG. 38).

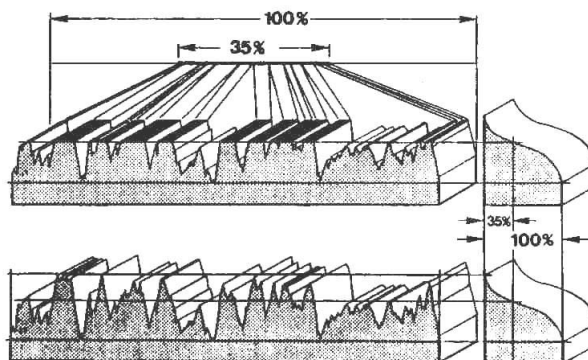


Figura 38: Curva de material Abbott-Firestone (MUMMERY, 1992)

A família  $S_k$  consiste dos parâmetros  $S_{pk}$ ,  $S_k$  e  $S_{vk}$  que são extraídos da curva de material (FIG. 39) e representam a altura média dos picos proeminentes acima da zona do núcleo, a profundidade da zona núcleo e a profundidade média dos vales projetados abaixo da zona núcleo, respectivamente. Os parâmetros  $S_{r1}$  e  $S_{r2}$  representam as porcentagens de área de suporte encontradas nos limites da zona núcleo. Pode-se ainda estabelecer um nível de seção  $S_{Htp}$  relativo a uma porcentagem arbitrária.

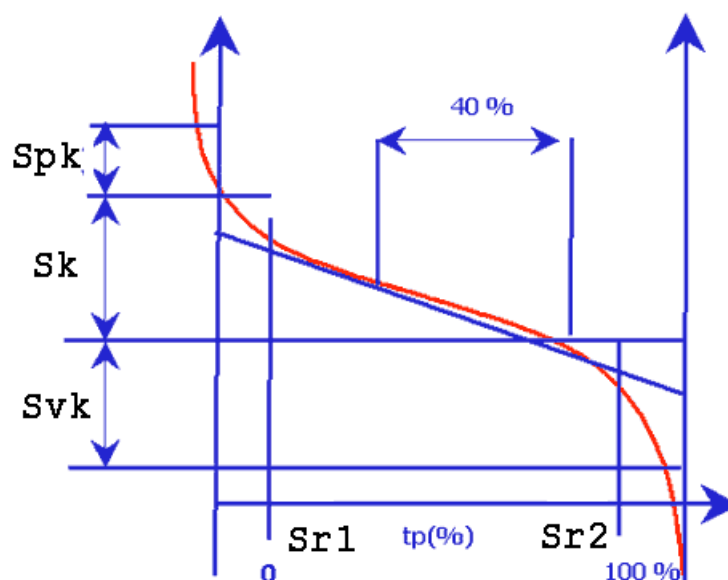


Figura 39: Extração dos parâmetros  $S_k$  a partir da curva de material (PRECISION DEVICES, INC., 2004)

### 3.4.5 Parâmetros Funcionais

Em varios casos é mais conveniente o uso de valores relativos, ao invés de grandezas físicas, para caracterizar as propriedades funcionais, tais como capacidade de lubrificação, resistência ao desgaste e propriedades de rolamento. Por exemplo, é mais fácil entender que uma superfície resiste bem ao desgaste se o parâmetro indicar um valor alto ou baixo relativo a uma escala de valores, do que se ele indicar uma grandeza física.

A seguir são apresentados estes índices.

**S<sub>bi</sub>**: índice da superfície de contato. É a razão entre o  $S_q$  e a altura em que se encontram 5% da área de contato, representada pela FIG. 40. Quanto maior for este índice, melhor são as propriedades de contato. Este índice costuma variar de 0,3 a 2. Normalmente quando uma superfície sofre desgaste este índice aumenta.

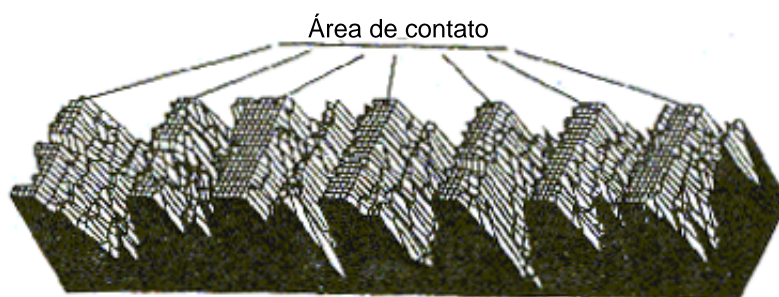


Figura 40: Representação da área de contato (MUMMERY, 1992)

**S<sub>ci</sub>**: índice da retenção de fluido no núcleo da rugosidade. É a razão entre o volume de vazios na zona núcleo da rugosidade, em uma unidade de área, e o  $S_q$ . Quanto maior for este índice, maior será a retenção de fluidos nesta região.

**S<sub>vi</sub>**: índice da retenção de fluido nos vales. É a razão entre o volume de vazios na zona dos vales, em uma unidade de área, e o  $S_q$ . Quanto maior for este índice, maior será a retenção de fluidos nesta região.

## 3.5 Microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG foi utilizado para fotografar as superfícies não desgastada e desgastada do canino e do molar e a superfície livre de desgaste do terceiro molar. O objetivo é complementar com uma análise qualitativa a análise numérica via perfilometria.

Aproveitamos a oportunidade para tirar fotos com ampliações pequenas de maneira a indicar melhor as facetas de desgaste investigadas (FIG. 41 e 42).

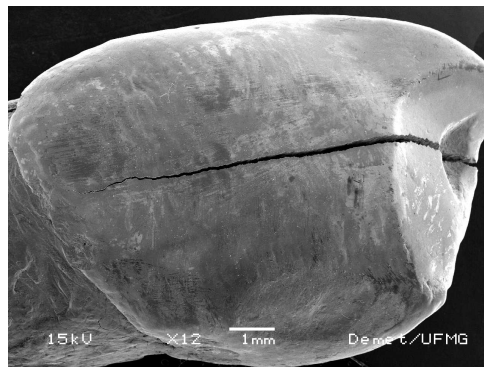


Figura 41: Detalhe da faceta horizontal localizada na face incisal do canino. Foto com ampliação de 12 vezes

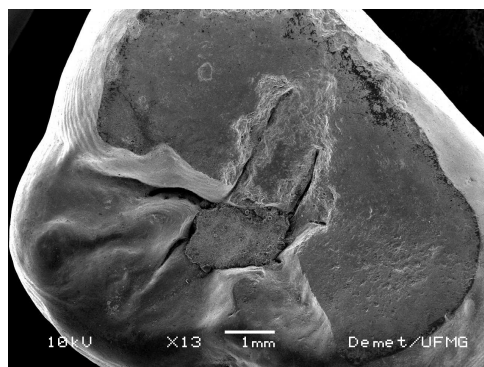


Figura 42: Detalhe das facetas horizontais localizadas na face oclusal do molar. Foto com ampliação de 13 vezes

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Terceiro molar**

Optamos por apresentar inicialmente os resultados obtidos para o terceiro molar, por ser a amostra que apresentava a natureza superficial mais preservada. Desta maneira a partir da caracterização da sua topografia, foi possível estabelecer parâmetros de referência para as demais amostras.

#### **4.1.1 Superfícies medidas**

Conforme indicado na seção 3.2.4, a área investigada neste dente foi a face vestibular, livre de desgaste (ver FIG. 27).

A FIG. 43 mostra o perfil de rugosidade da superfície não desgastada após seleção de área, correção de defeitos de medição, remoção de forma polinomial, filtragem e corte. A FIG. 44 detalha o perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio.

#### **4.1.2 Justificativa de corte**

A curva de material do terceiro molar, na face não desgastada, está representada pela FIG. 45. A profundidade máxima das irregularidades, a partir do pico mais elevado, é de  $9,52\mu m$ . Na FIG. 46 estão traçados dois níveis indicando que a uma profundidade de  $2,84\mu m$  encontra-se apenas 1% de material e que a uma profundidade de  $8,04\mu m$  já se encontra 99% do material. Se resolvermos efetuar o corte nestes dois níveis, estaremos excluindo uma altura superior de  $2,84\mu m$  e uma altura inferior de  $1,48\mu m$ , resultando num total de  $4,32\mu m$ . Essa altura representa 45% da altura total das irregularidades, embora concentre apenas 2% de material, ou seja, uma porcentagem muito pequena de material contribui com uma altura muito elevada e por isso pode ser excluída.

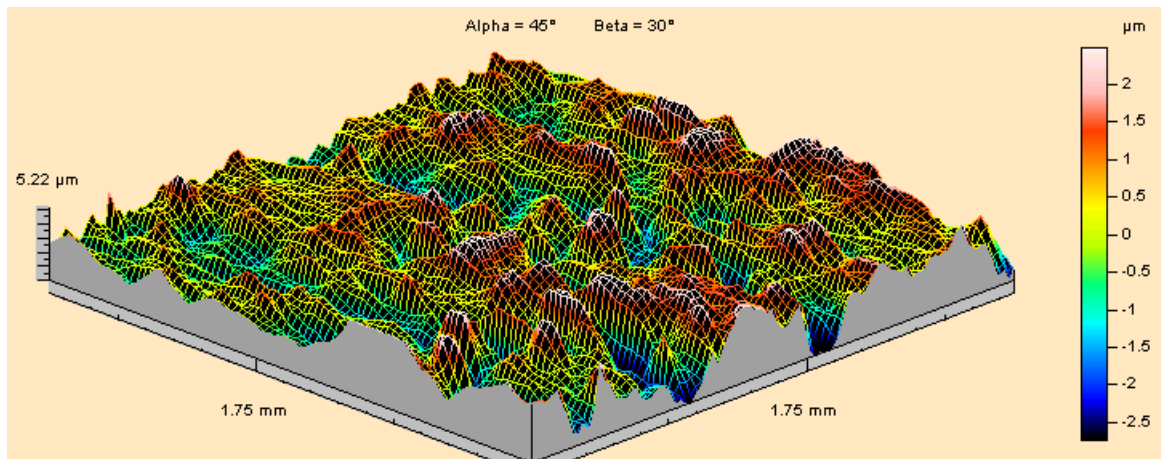


Figura 43: Perfil de rugosidade da superfície não desgastada do terceiro molar

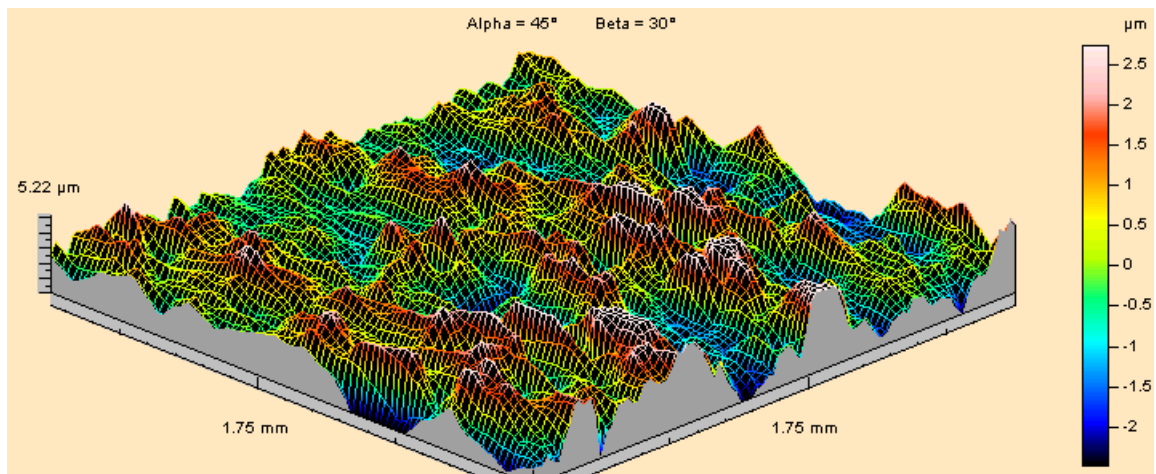


Figura 44: Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície não desgastada do terceiro molar

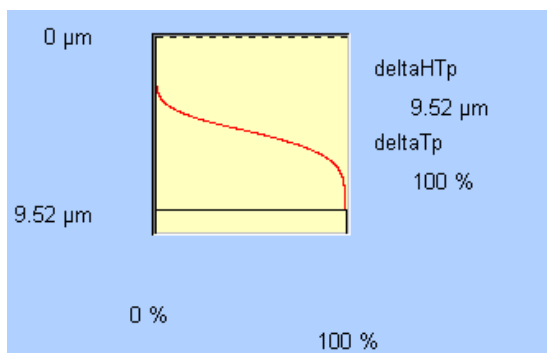


Figura 45: Curva de material da superfície não desgastada do terceiro molar

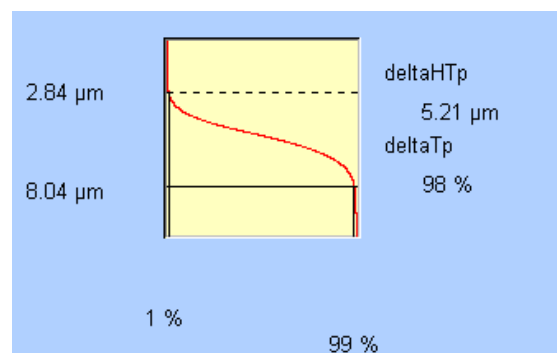


Figura 46: Níveis de corte a 1% e a 99% de material

## 4.2 Parâmetros de textura superficial

A TAB. 1 apresenta os parâmetros de textura superficial obtidos para o terceiro molar.

Filtro $\lambda_c = 0,25mm$	Terceiro molar
$Sa(\mu m)$	0,829
$Sq(\mu m)$	1,04
$Sds(p/mm^2)$	11596
$Str$	0,304
$Sdq(mm/mm)$	0,097
$Ssc(1/mm)$	0,0531
$Sdr(\%)$	0,467
$Sbi$	1,28
$Svi$	0,127
$Sci$	1,49
$Sk(\mu m)$	1,35
$Spk(\mu m)$	0,883
$Svk(\mu m)$	0,859
$Sr1(\%)$	11,6
$Sr2(\%)$	87,6
% de material nos vales	12,4
$\Psi$	1,94

Tabela 1: Parâmetros de textura superficial obtidos para o terceiro molar

### 4.2.1 Discussão dos parâmetros

Analisando a superfície do terceiro molar, é importante ressaltar que o dente utilizado estava semi-incluso, livre de contato oclusal, portanto com sua textura superficial preservada. Verifica-se que o parâmetro  $Str$  está em torno de 0,3, o que indica a presença de periquimácias. De acordo com os parâmetros da família  $Sk$ , a superfície apresenta distribuição simétrica de amplitudes e concentração de material em torno da linha média, pois existe semelhança entre os valores de  $Svk$  e  $Spk$  e entre os valores de  $Sr1$  e a porcentagem de material nos vales. Predomina nesta superfície uma rugosidade aberta, já que o valor de  $Sk$  é bem superior aos demais parâmetros da família, amplitudes elevadas e alta densidade de picos, o que era de se esperar pois numa superfície não desgasta a terminação dos prismas deve ser bem pronunciada. Observam-se boas condições em relação à resistência ao desgaste, uma vez que o contato é predominantemente elástico, devido à baixa inclinação média  $Sdq$ , além de haver uma boa capacidade de suporte  $Sbi$  e boa capacidade de retenção de fluido na região do núcleo.



### 4.2.2 Microscopia eletrônica de varredura

A foto obtida via MEV para a superfície do terceiro molar indica a presença das periquimácias. Observe na FIG. 47 que as partes claras são as porções mais elevadas das periquimácias, enquanto que as partes escuras são os vales. A FIG. 48 detalha as porções mais elevadas, podendo ser percebidas as terminações dos prismas. Essas observações justificam algumas das análises dos parâmetros feitas na seção 4.2.1 uma vez que, além da presença das periquimácias, foi possível verificar a simetria entre vales e picos e as amplitudes elevadas das irregularidades devidas às terminações dos prismas.

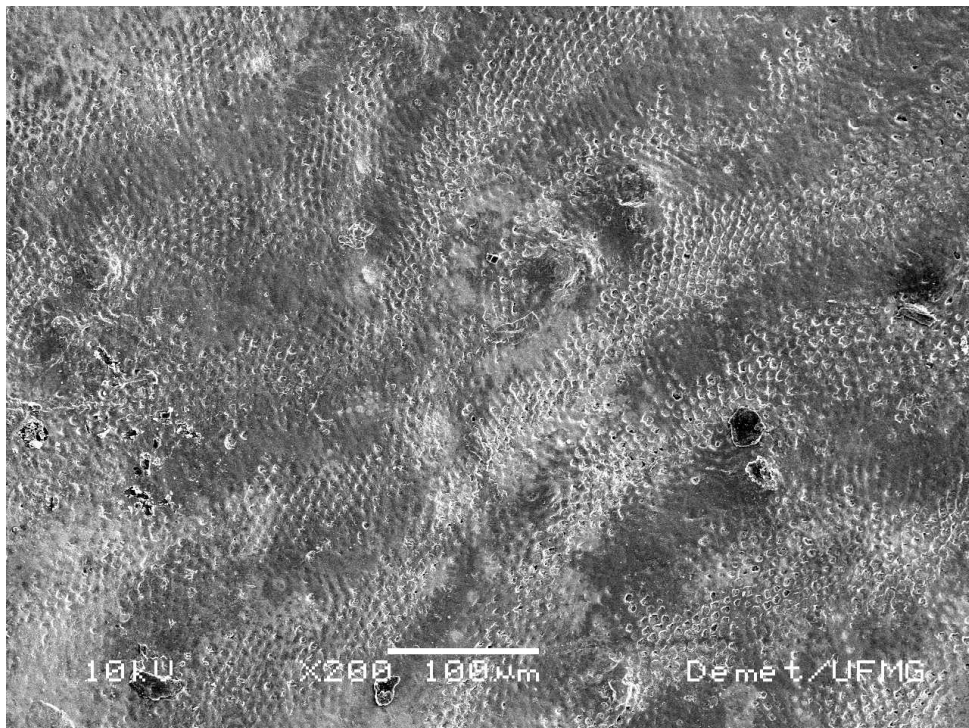


Figura 47: Superfície do terceiro molar ampliada 200 vezes

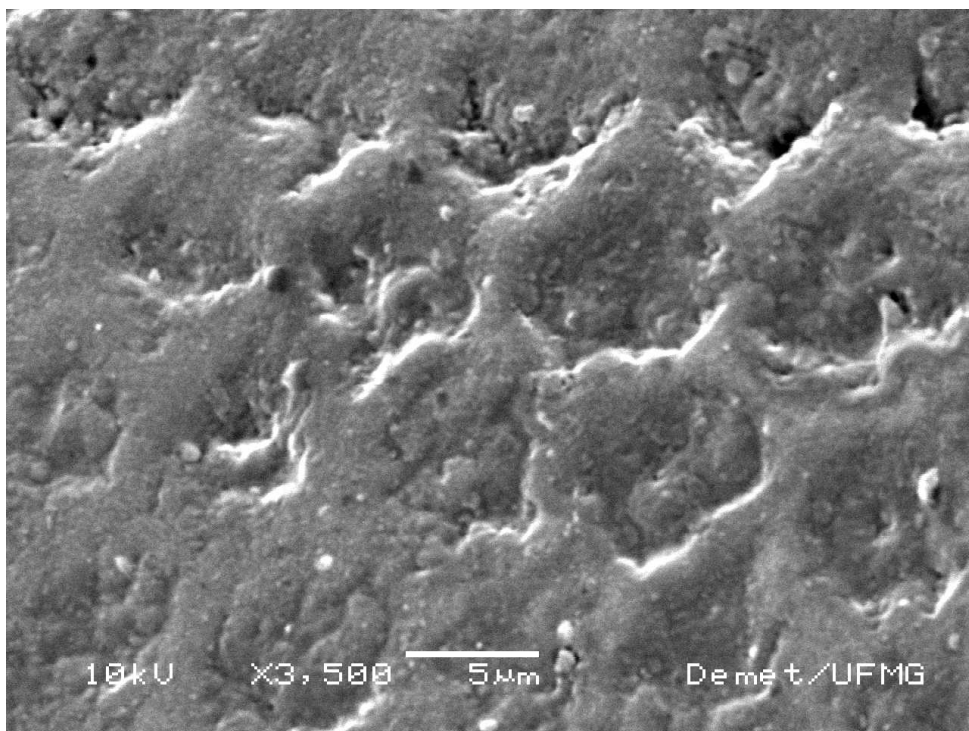


Figura 48: Superfície do terceiro molar ampliada 3500 vezes

## 4.3 Canino

### 4.3.1 Superfícies medidas

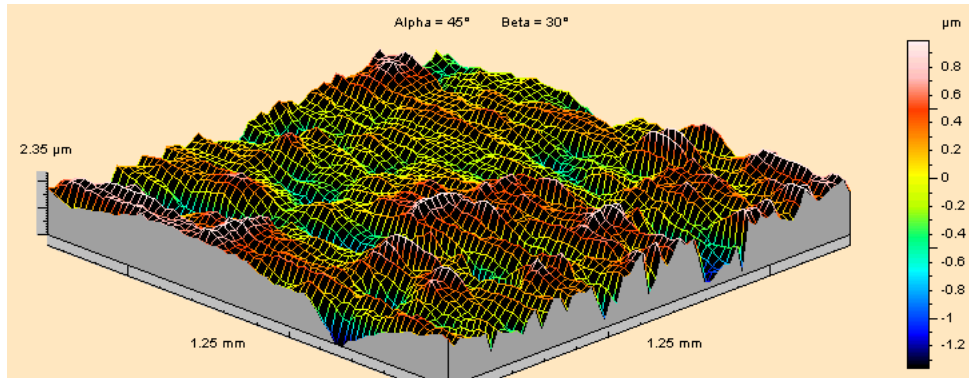


Figura 49: Perfil de rugosidade da superfície não desgastada do canino

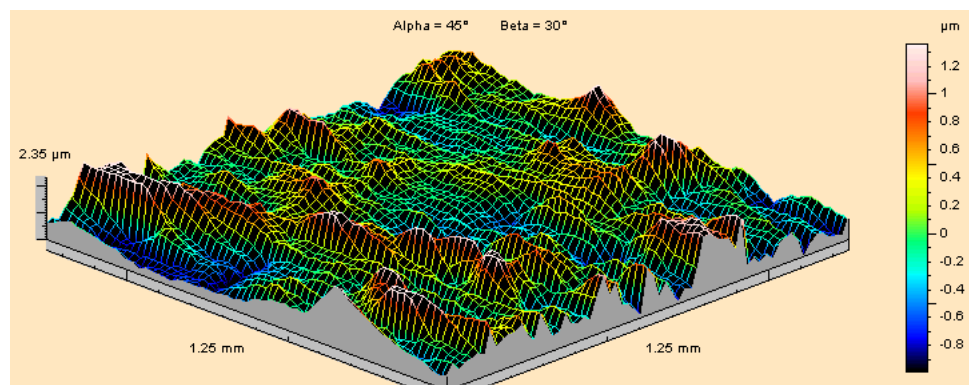


Figura 50: Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície não desgastada do canino

Conforme indicado na seção 3.2.1, a primeira área investigada neste dente foi a face incisal, onde encontrava-se uma faceta de desgaste horizontal. Além desta faceta, selecionou-se uma área livre de desgaste na face vestibular, indicada na FIG. 25.

A FIG. 49 mostra o perfil de rugosidade da superfície não desgastada após seleção de área, correção de defeitos de medição, remoção de forma polinomial, filtragem e corte. A FIG. 50 ilustra o perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio.

A FIG. 51 ilustra o perfil de rugosidade da superfície desgastada após seleção de área, correção de defeitos de medição, remoção de forma polinomial, filtragem e corte. A FIG. 52 ilustra o perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio.

### 4.3.2 Justificativa de corte

Conforme descrito na seção 3.3.2, os parâmetros de textura superficial para avaliação da superfície são extraídos do perfil de rugosidade após o “thresholding”. Entretanto, para

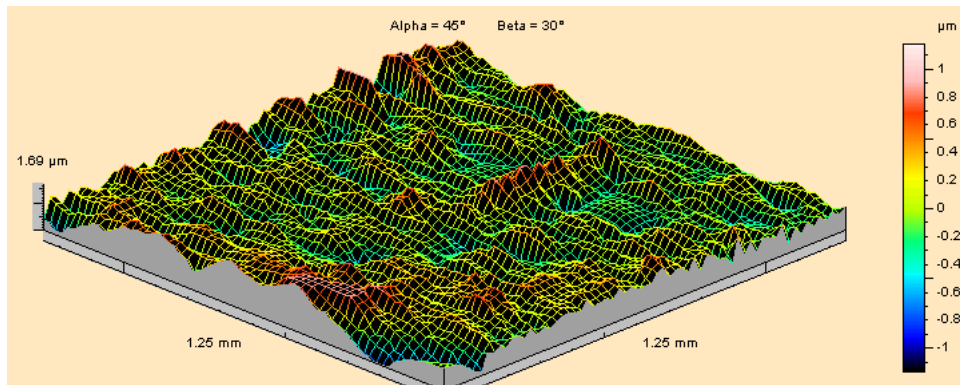


Figura 51: Perfil de rugosidade da superfície desgastada do canino

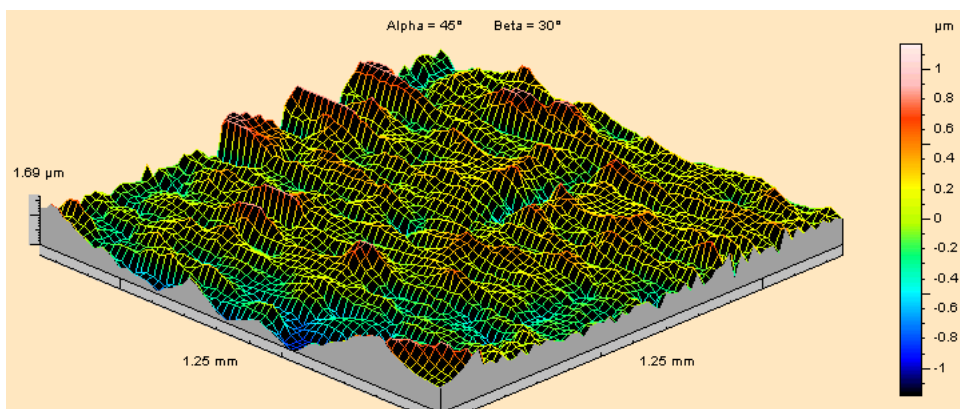


Figura 52: Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície desgastada do canino

uma maior confiabilidade dos resultados, este corte deve ser justificado.

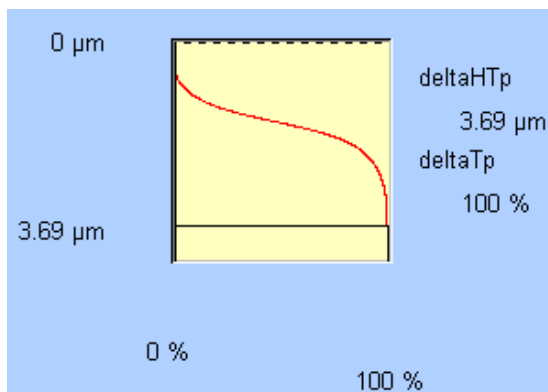


Figura 53: Curva de material da superfície não desgastada do canino

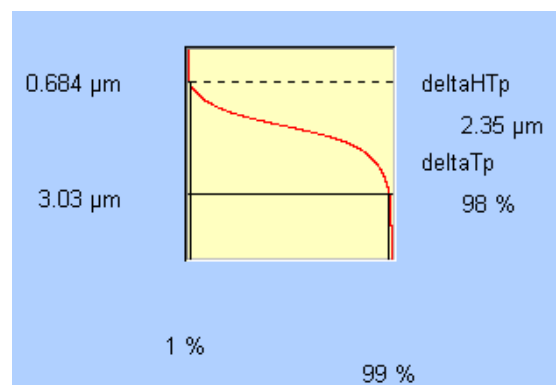


Figura 54: Níveis de corte a 1% e a 99% de material

Iniciamos a análise do canino, comparando os resultados encontrados para a face não desgastada com os obtidos para o terceiro molar. Desta forma, percebemos que a média quadrática das amplitudes,  $S_q$ , apresentou-se mais elevada para o primeiro, com uma diferença percentual de aproximadamente 56%. Tal fato pode ser justificado uma vez que o terceiro molar, por ter estado semi-incluso enquanto na boca do paciente foi o

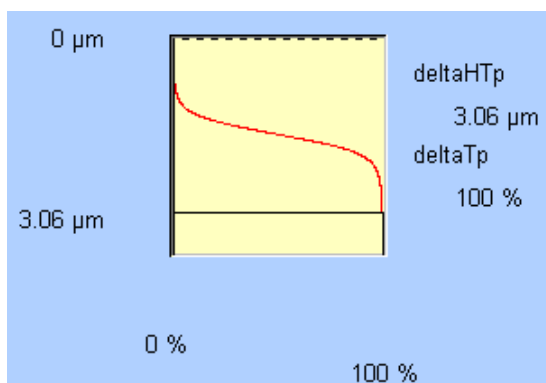


Figura 55: Curva de material da superfície desgastada do canino

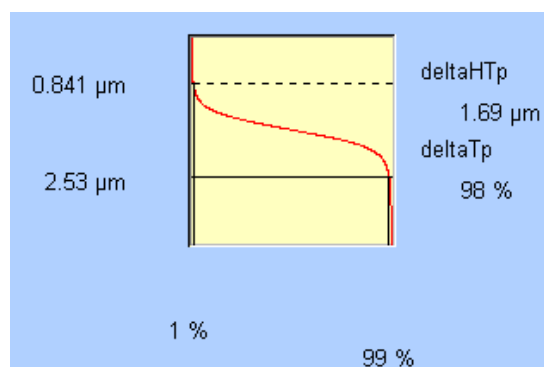


Figura 56: Níveis de corte a 1% e a 99% de material

que manteve sua natureza superficial mais preservada, conservando as terminações dos prismas proeminentes. Ainda que a área comparada do canino estivesse livre de contato oclusal, o contato com o bolo alimentar ou mesmo a escovação pode tê-lo desgastado.

Passando à análise dos parâmetros da família Sk, extraídos da curva de razão de área de suporte, verifica-se que o terceiro molar é o que apresenta maior simetria de distribuição de concentração de material. Constata-se que a diferença de alturas entre a zona de picos e a zona de vales ( $S_{vk} - S_{pk}$ ) é menor do que 3%. Em relação à concentração de material percebe-se que o volume de material na zona de picos oferece uma área de suporte apenas 7% menor do que a acrescentada pela região dos vales (% vales - % picos). O mesmo não se pode dizer quanto à área livre de contato oclusal do canino. Há uma sensível diferença nas alturas, sendo que a zona de vales é 34% mais profunda do que a zona dos picos. Estes vales são mais fechados do que os do terceiro molar, pois neste caso oferecem um acréscimo na área de suporte 11% maior. Estas diferenças acusam a presença de agentes químicos que afetam principalmente os vales pela facilidade de se depositarem os fluidos nesta região, sejam provenientes da própria saliva ou da dieta alimentar.

Estas primeiras comparações foram úteis para verificar que apesar de livre de contato oclusal qualquer região do dente pode estar sujeita a outras solicitações degradantes.

Passamos agora à comparação das duas áreas distintas do canino. A curva de material do canino, na face não desgastada, está representada pela FIG. 53. A profundidade máxima das irregularidades, a partir do pico mais elevado, é de  $3,69\mu m$ . Na FIG. 54 estão traçados dois níveis indicando que a uma profundidade de  $0,684\mu m$  encontra-se apenas 1% de material e que a uma profundidade de  $3,03\mu m$  já se encontra 99% do material. Se resolvermos efetuar o corte nestes dois níveis, estaremos excluindo uma amplitude superior de  $0,684\mu m$  e uma amplitude inferior de  $0,66\mu$ , resultando num total de  $1,344\mu m$ . Essa amplitude representa 36% da amplitude total das irregularidades, embora concentre apenas 2% de material, ou seja, uma percentagem muito pequena de material contribui com uma amplitude muito elevada e por isso pode ser excluída.

A curva de material para a faceta desgastada está representada pela FIG. 55. Os níveis de corte (FIG.56) indicam que a uma profundidade de  $0,841\mu m$  encontra-se apenas 1%

de material enquanto que a uma profundidade de  $2,53\mu m$  já se encontra 99% do material, ou seja, numa escala de 0 a  $3,06\mu m$ , apenas 2% de material contribuem com 45% da amplitude de irregularidades.

### 4.3.3 Parâmetros de textura superficial

A TAB. 2 apresenta os parâmetros de textura superficial obtidos para as superfícies não desgastada e desgastada do canino.

Filtro $\lambda_c = 0,25mm$	Área não desgastada	Área desgastada	%
$Sa(\mu m)$	0,35	0,232	-33,71
$Sq(\mu m)$	0,458	0,3	-34,50
$Sds(p/mm^2)$	15247	13801	-9,48
$Str$	0,254	0,453	78,35
$Sdq(mm/mm)$	0,0826	0,0714	-13,56
$Ssc(1/mm)$	0,0502	0,0482	-3,98
$Sdr(\%)$	0,338	0,254	-24,85
$Sbi$	1,7	0,836	-50,82
$Svi$	0,158	0,127	-19,62
$Sci$	1,43	1,52	6,29
$Sk(\mu m)$	0,592	0,499	-15,71
$Spk(\mu m)$	0,317	0,227	-28,39
$Svk(\mu m)$	0,426	0,258	-39,44
$Sr1(\%)$	11,8	11	6,78
$Sr2(\%)$	86,9	88	-1,27
% de material nos vales	13,1	12	-8,39
$\Psi$	1,65	1,43	-13,56

Tabela 2: Parâmetros de textura superficial obtidos para as superfícies não desgastada e desgastada do canino

### 4.3.4 Discussão dos parâmetros

Analisando a superfície não desgastada, verifica-se que o parâmetro  $Str$  é menor que 0,3, indicando que ela é do tipo anisotrópica, ou seja, há a existência de sulcos e cristas com uma direção bem pronunciada. Quanto maior a anisotropia, menor o valor de  $Str$ . Este parâmetro parece indicar que nesta região ainda existe a presença das periquimácias, sulcos ondulados que refletem o padrão incremental de formação de esmalte (ver nas seções 2.5.1 e 2.5.2). Já a superfície desgastada não corresponde a esse mesmo padrão de textura, visto um aumento de 78% no valor de  $Str$ . Isso sugere a existência de sulcos em direções diferentes das periquimácias originais.

Estas periquimácias se apresentam como círculos concêntricos em torno do eixo da coroa. Observando o dente vemos que a direção do movimento que originou a faceta desgastada

é contrária a esses círculos, provocando sulcos em direções diferentes das periquimácias originais. Com isso o padrão anisotrópico da superfície foi atenuado.

De acordo com os parâmetros da família Sk, a superfície não desgastada apresenta amplitude e concentração de material maior nos vales do que nos picos. Observa-se pelos parâmetros Svk e Spk que a amplitude dos vales é 34% maior do que dos picos e, pelos parâmetros Sr1 e Sr2, que a região dos vales concentram 11% a mais de material do que os picos. Para a superfície desgastada a diferença de amplitudes cai para 13%, enquanto que a diferença na porcentagem de material cai para 9%. Ou seja, o desgaste tornou a distribuição das irregularidades mais simétrica em relação ao plano médio da superfície. Pode-se perceber pelos perfis normal e invertido da superfície desgastada (FIG 51 e 52) que as amplitudes e formas dos vales não se diferem muito da dos picos.

Não há indicação de ter havido deformação plástica das asperezas superiores, pois isso as teria suavizado. Acontece que o número de picos praticamente permaneceu o mesmo e com a mesma geometria, uma vez que não houve mudança significativa dos parâmetros Sds e Ssc, que informam sobre a densidade e curvatura dos picos, respectivamente. Pode-se afirmar que, neste caso, o tipo de desgaste dominante foi o por fratura frágil presente na zona de picos, uma vez que as asperezas da contra-face não foram capazes de afetar a região dos vales.

Enquanto estes dois parâmetros, Sds e Ssc, indicam propriedades específicas dos picos, o parâmetro Sdq, calculado ao longo da superfície, informa sobre a inclinação média da mesma. Houve uma ligeira redução deste parâmetro, indicando uma suavização da superfície de maneira geral, acompanhada de uma redução da área interfacial (Sdr). Pode-se sugerir que o desgaste ocorrido nesta região foi brando.

O índice de superfície de contato, Sbi, que relaciona a amplitude média das irregularidades com a altura referente a 5% de área de contato, informa que a capacidade de carga da superfície desgastada é menor. Enquanto na superfície não desgastada o seu valor era de 1,7, indicando que acima da linha média se encontra uma área de contato maior que 5%, na superfície desgastada essa porcentagem só é encontrada abaixo da linha média. Esta redução na capacidade de carga é agravada pela redução na capacidade de retenção de fluido na região dos vales (Sci). Sabe-se que a saliva tem importante propriedade de lubrificação diminuindo o atrito e seus efeitos termais. Assim, a redução da sua retenção aumentaria a severidade do desgaste, se ele continuasse a acontecer no dente. Entretanto, como a redução da angulação da superfície corresponde também à redução do índice de plasticidade,  $\psi$ , uma vez que este é calculado a partir do Sdq, as condições de contato tornaram-se mais elásticas, compensando um pouco esse acréscimo na severidade.

### 4.3.5 Microscopia eletrônica de varredura

As fotos obtidas via MEV para as superfícies avaliadas do canino confirmam a perda da anisotropia no padrão da textura, indicada pela avaliação do parâmetro Str na seção 4.3.4. Apesar de não se conseguir identificar a presença das periquimácias na FIG. 57,

percebe-se claramente na FIG. 58 a presença de sulcos em várias direções.

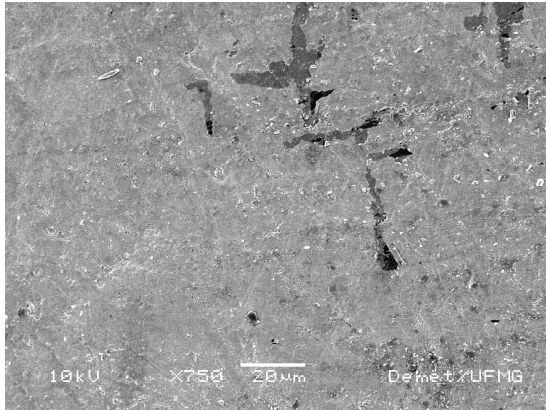


Figura 57: Superfície não desgastada do canino ampliada 750 vezes (elétrons retroespalhados)

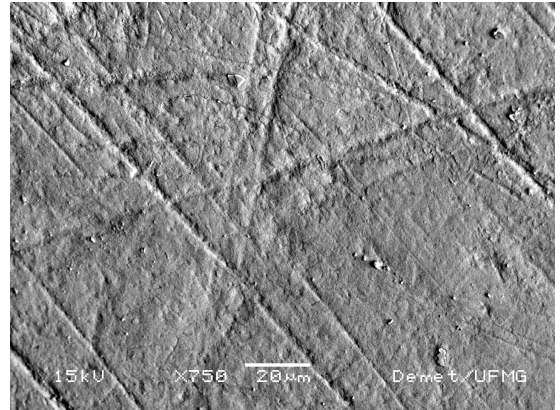


Figura 58: Superfície desgastada do canino ampliada 750 vezes (elétrons retroespalhados)



## 4.4 Pré-molar

### 4.4.1 Superfícies medidas

Conforme indicado na seção 3.2.2, as áreas investigadas neste dente foram a face vestibular, livre de desgaste, e a face oclusal, com facetas de desgaste, como se vê na FIG. 27.

A FIG. 59 ilustra o perfil de rugosidade da superfície não desgastada após seleção de área, correção de defeitos de medição, remoção de forma polinomial, filtragem e corte. A FIG. 60 mostra o perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio.

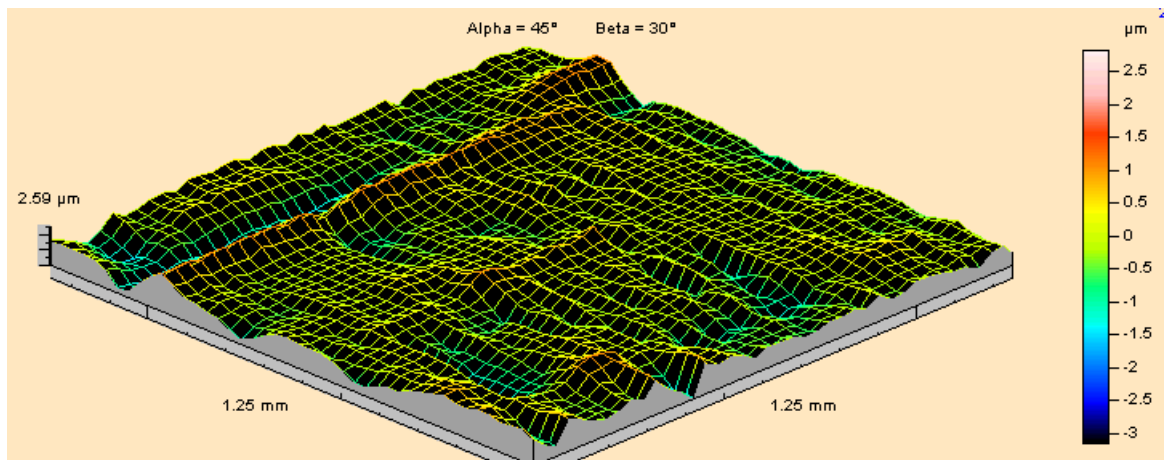


Figura 59: Perfil de rugosidade da superfície não desgastada do pré-molar

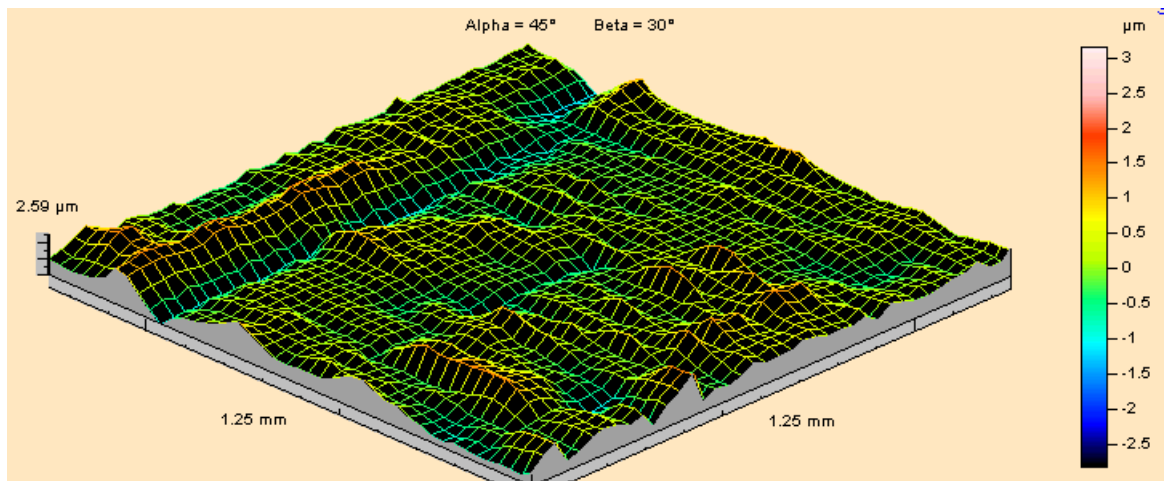


Figura 60: Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície não desgastada do pré-molar

A FIG. 61 ilustra o perfil de rugosidade da superfície desgastada após seleção de área, correção de defeitos de medição, remoção de forma polinomial, filtragem e corte. A FIG. 62 contém o perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio.

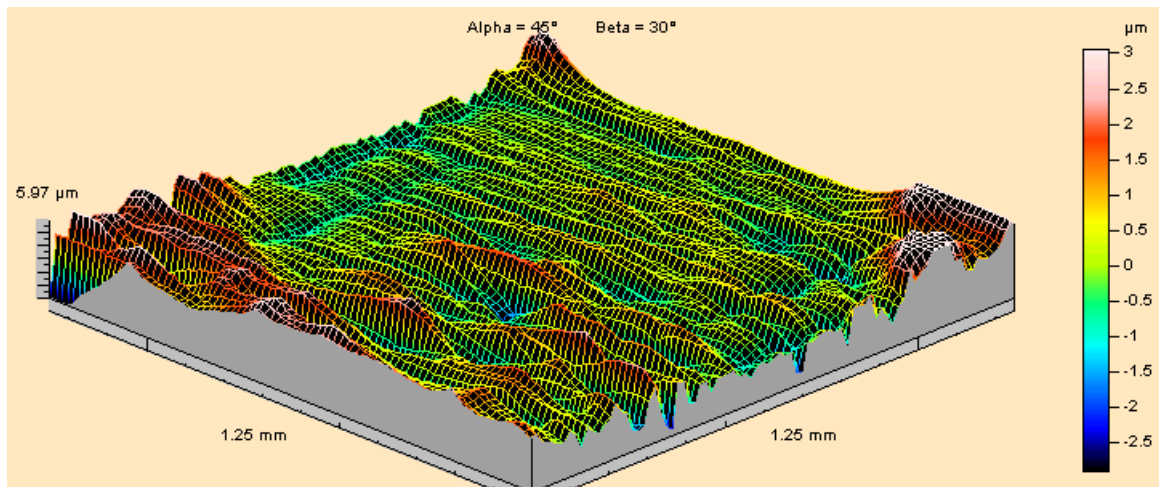


Figura 61: Perfil de rugosidade da superfície desgastada do pré-molar

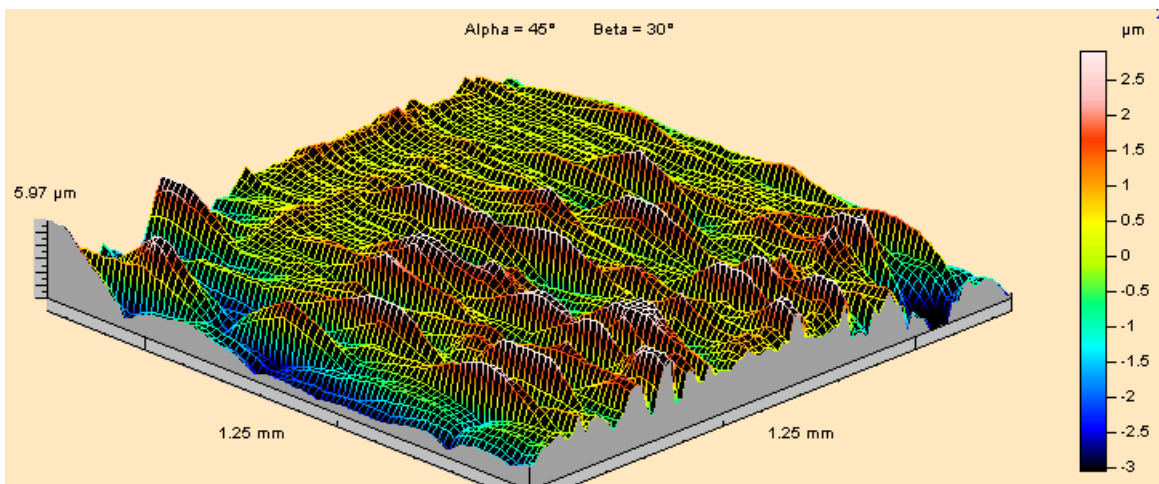


Figura 62: Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície desgastada do pré-molar

#### 4.4.2 Justificativa de corte

A curva de material do pré-molar, na face não desgastada, está representada pela FIG. 63. A profundidade máxima das irregularidades, a partir do pico mais elevado, é de  $4,19\mu\text{m}$ . Na FIG. 64 estão traçados dois níveis indicando que a uma profundidade de  $0,915\mu\text{m}$  encontra-se apenas 1% de material e que a uma profundidade de  $3,49\mu\text{m}$  já se encontra 99% do material. Se resolvermos efetuar o corte nestes dois níveis, estaremos excluindo uma altura superior de  $0,915\mu\text{m}$  e uma altura inferior de  $0,7\mu\text{m}$ , resultando num total de  $1,615\mu\text{m}$ . Essa altura representa 38% da altura total das irregularidades, embora concentre apenas 2% de material, ou seja, uma porcentagem muito pequena de material contribui com uma altura muito elevada e por isso pode ser excluída.

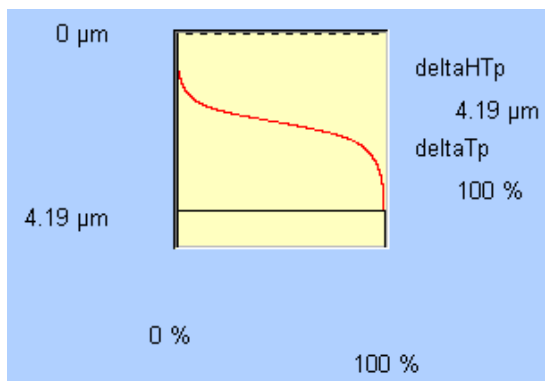


Figura 63: Curva de material da superfície não desgastada do pré-molar

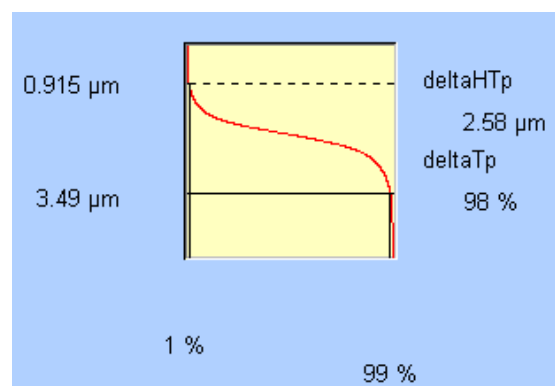


Figura 64: Níveis de corte a 1% e a 99% de material

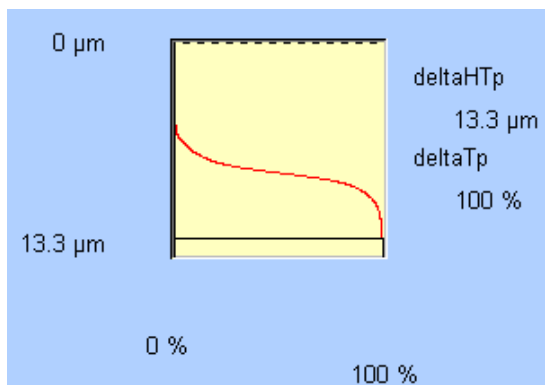


Figura 65: Curva de material da superfície desgastada do pré-molar

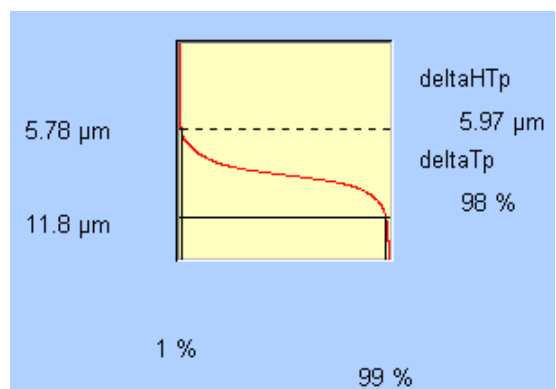


Figura 66: Níveis de corte a 1% e a 99% de material

A curva de material para a faceta desgastada está representada pela FIG. 65. Os níveis de corte (FIG.66) indicam que a uma profundidade de  $5,78\mu m$  encontra-se apenas 1% de material enquanto que a uma profundidade de  $11,8\mu m$  já se encontra 99% do material, ou seja, numa escala de 0 a  $13,3\mu m$ , apenas 2% de material contribuem com 55% da altura de irregularidades.

### 4.4.3 Parâmetros de textura superficial

A TAB. 3 apresenta os parâmetros de textura superficial obtidos para as superfícies não desgastada e desgastada do pré-molar.

### 4.4.4 Discussão dos parâmetros

Conforme já esperado, o padrão de textura indicado pelo Str é do tipo anisotrópico, novamente devido à presença das periquimácias. Entretanto, para este dente houve redução do Str indicando que a superfície desgastada tem um aspecto de textura ainda mais direcional, sugerindo que a direção do movimento do dente antagonista tenha sido paralela

Filtro $\lambda_c = 0,25mm$	Área não desgastada	Área desgastada	%
$Sa(\mu m)$	0,336	0,768	128,57
$Sq(\mu m)$	0,452	1,05	132,30
$Sds(p/mm^2)$	7498	24561	227,57
$Str$	0,295	0,144	-51,19
$Sdq(mm/mm)$	0,0586	0,165	181,57
$Scs(1/mm)$	0,0233	0,107	359,23
$Sdr(\%)$	0,171	1,29	654,38
$Sbi$	0,914	0,932	1,97
$Svi$	0,153	0,139	-9,15
$Sci$	1,48	1,72	16,22
$Sk(\mu m)$	0,589	1,48	151,27
$Spk(\mu m)$	0,326	0,705	116,26
$Svk(\mu m)$	0,446	1,26	182,51
$Sr1(\%)$	11,2	12	7,14
$Sr2(\%)$	87,5	84,3	-3,66
% de material nos vales	12,5	15,7	25,6
$\Psi$	1,17	3,03	181,57

Tabela 3: Parâmetros de textura superficial obtidos para as superfícies não desgastada e desgastada do pré-molar

às periquimácias.

Ao contrário do que se acredita ter acontecido com o canino, no qual o desgaste concentrou-se nas porções mais elevadas entre as periquimácias, para o pré-molar os vales foram afetados, aumentando a amplitude das irregularidades. Uma boa indicação disto é dada pelos parâmetros da família Sk. Percebe-se que a região mais afetada foi a dos vales, uma vez que o maior aumento de amplitude se deu para o parâmetro Svk (182%) e também, nesta região, se deu o maior aumento na concentração de materiais (25,6%).

Considerando que houve novamente desgaste por fratura, para a sub-superfície do material ter sido afetada de tal forma, deve ter havido a formação de trincas laterais conforme mostrado no item 2.3.2 levando à remoção de material. Este resultado sugere um maior grau de severidade para este caso.

O índice de superfície de contato, Sbi, não se alterou. Isto porque, apesar de haver um aumento na densidade de picos (Sds), aumentando o número de pontos de contato, as irregularidades tornaram-se mais afiadas com o aumento do Ssc, diminuindo a contribuição de área para suporte de carga individual de cada aspereza. Vale ressaltar que o índice Sbi já era baixo mesmo para a área não desgastada, uma vez que a altura referente a 5% da área de contato se encontrava abaixo do plano médio. Isto contribui com a explicação para a maior severidade do desgaste neste dente, uma vez que ele apresentava uma superfície mais frágil.

Ainda que tenha havido um aumento da capacidade de retenção de saliva no núcleo da rugosidade, isto não seria suficiente para amenizar a severidade do desgaste, caso ele

---

continuasse a existir. Uma vez que a superfície tornou-se mais angulosa com o aumento do  $Sdq$ , e conseqüentemente com o aumento do índice de plasticidade, as condições de contato se tornaram menos elásticas, aumentando as chances de formação de novas trincas.

## 4.5 Molar

### 4.5.1 Superfícies medidas

Conforme indicado na seção 3.2.3, as áreas investigadas neste dente foram a face vestibular, livre de desgaste, e a face oclusal com facetas de desgaste conforme ilustra a FIG. 27.

A FIG. 67 mostra o perfil de rugosidade da superfície não desgastada após seleção de área, correção de defeitos de medição, remoção de forma polinomial, filtragem e corte. A FIG. 68 detalha o perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio.

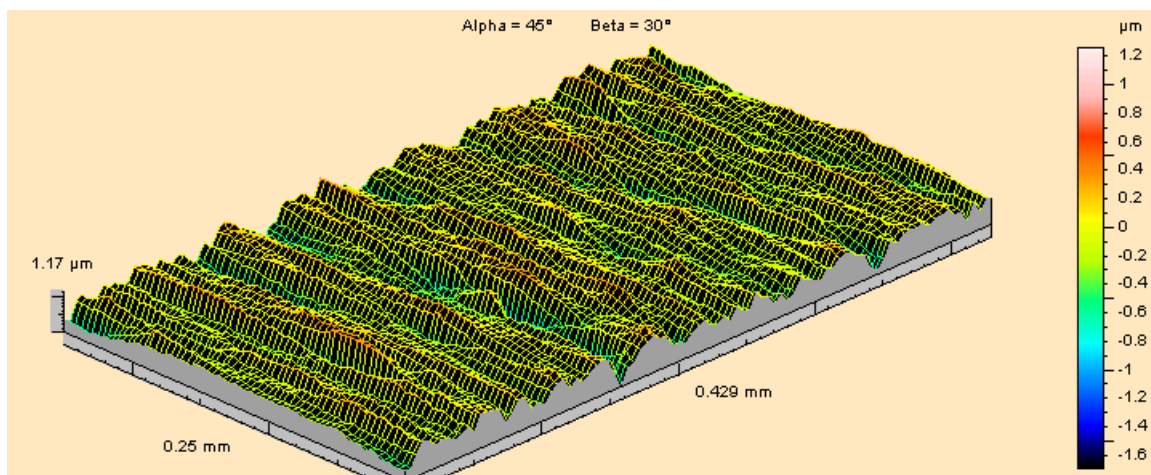


Figura 67: Perfil de rugosidade da superfície não desgastada do molar

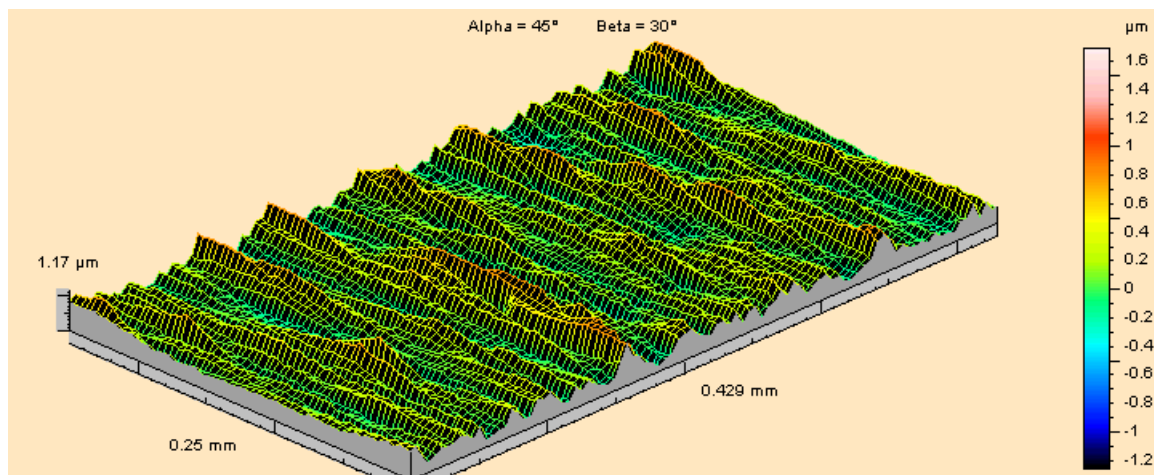


Figura 68: Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície não desgastada do molar

A FIG. 69 ilustra o perfil de rugosidade da superfície desgastada após seleção de área, correção de defeitos de medição, remoção de forma polinomial, filtragem e corte. A FIG. 70 mostra o perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio.

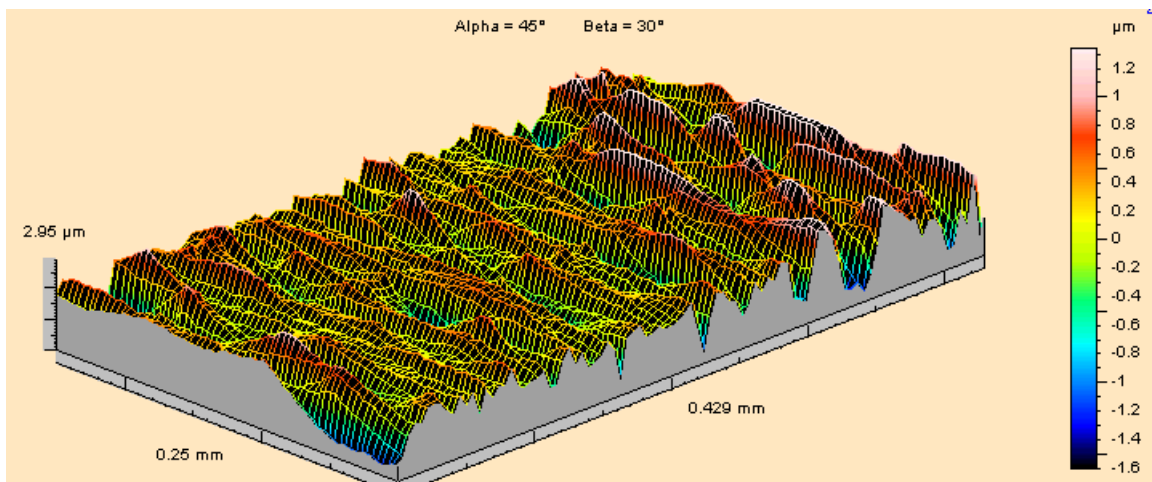


Figura 69: Perfil de rugosidade da superfície desgastada do molar

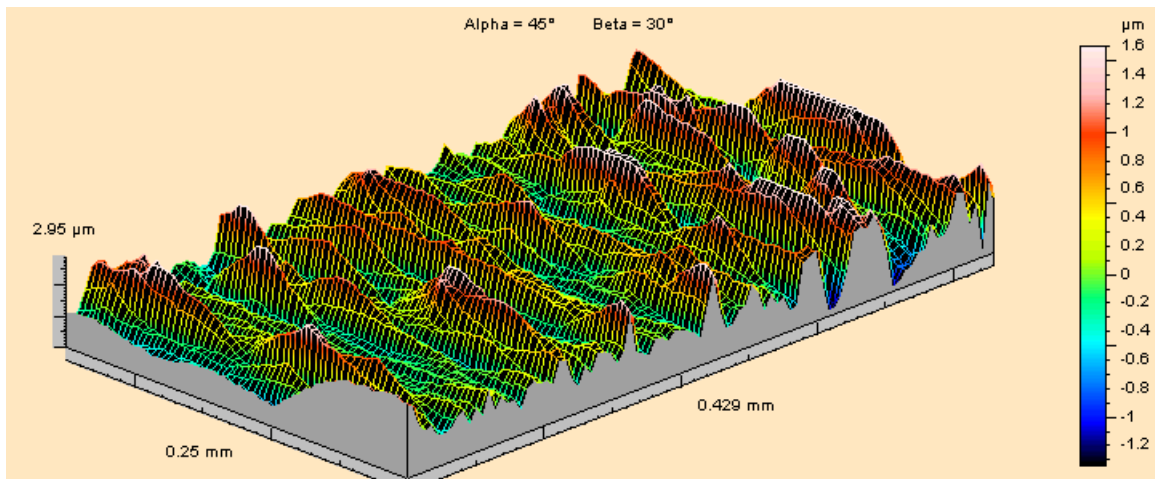


Figura 70: Perfil de rugosidade invertido em relação ao plano médio da superfície desgastada do molar

### 4.5.2 Justificativa de corte

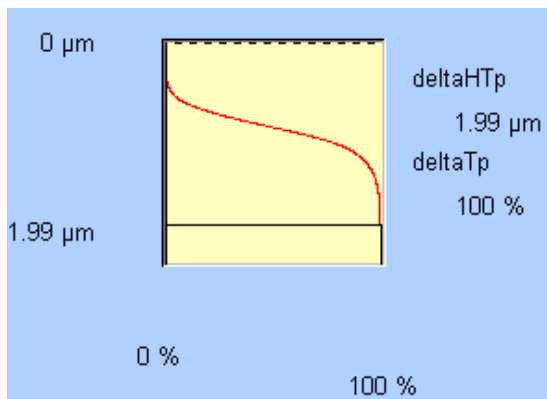


Figura 71: Curva de material da superfície não desgastada do molar

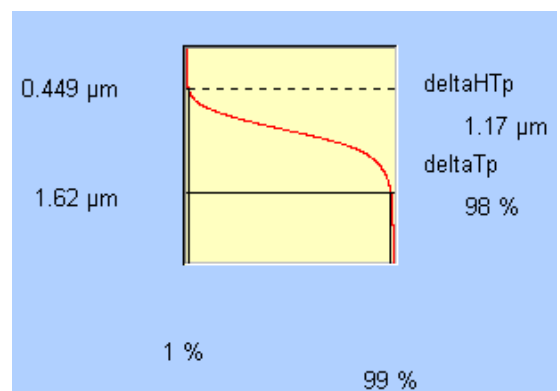


Figura 72: Níveis de corte a 1% e a 99% de material

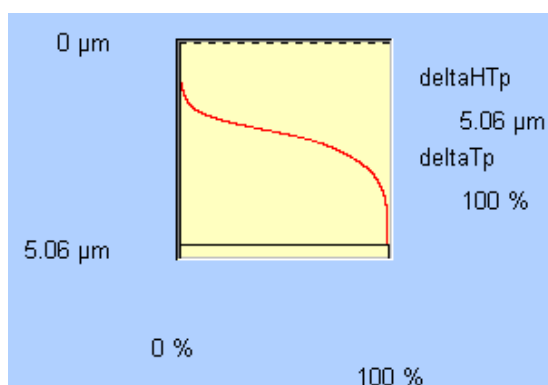


Figura 73: Curva de material da superfície desgastada do molar

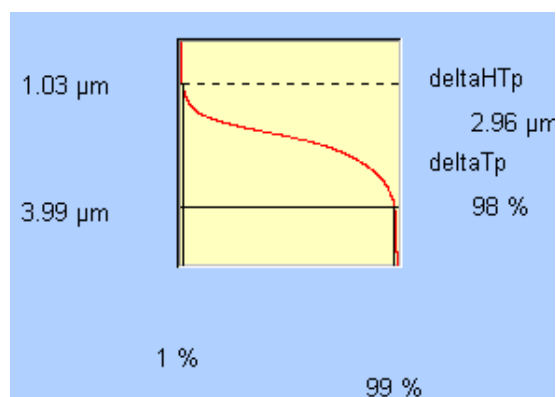


Figura 74: Níveis de corte a 1% e a 99% de material

A curva de material do molar, na face não desgastada, está representada pela FIG. 71. A profundidade máxima das irregularidades, a partir do pico mais elevado, é de  $1,99\mu m$ . Na FIG. 72 estão traçados dois níveis indicando que a uma profundidade de  $0,449\mu m$  encontra-se apenas 1% de material e que a uma profundidade de  $1,62\mu m$  já se encontra 99% do material. Se resolvermos efetuar o corte nestes dois níveis, estaremos excluindo uma altura superior de  $0,449\mu m$  e uma altura inferior de  $0,37\mu m$ , resultando num total de  $0,819\mu m$ . Essa altura representa 41% da altura total das irregularidades, embora concentre apenas 2% de material, ou seja, uma porcentagem muito pequena de material contribui com uma altura muito elevada e por isso pode ser excluída.

A curva de material para a faceta desgastada está representada pela FIG. 73. Os níveis de corte (FIG.74) indicam que a uma profundidade de  $1,03\mu m$  encontra-se apenas 1% de material enquanto que a uma profundidade de  $3,99\mu m$  já se encontra 99% do material, ou seja, numa escala de 0 a  $5,06\mu m$ , apenas 2% de material contribuem com 42% da altura de irregularidades.

### 4.5.3 Parâmetros de textura superficial

A TAB. 4 apresenta os parâmetros de textura superficial obtidos para as superfícies não desgastada e desgastada do molar.

### 4.5.4 Discussão dos parâmetros

Assim como para o pré-molar, o fato do Str indicar o mesmo padrão de textura anisotrópica para as superfícies não desgastada e desgastada sugere que a direção do movimento tenha sido paralela às periquimácias.

Também para esse caso o aumento das amplitudes das irregularidades indica que houve formação de trincas e arrancamento de material da sub-superfície. Entretanto o mecanismo ocorrido para este dente, foi um pouco diferente do que para o pré-molar. Aqui também os vales foram afetados aumentando de profundidade (Svk 80% maior) e con-



Filtro $\lambda_c = 0,05mm$	Área não desgastada	Área desgastada	%
$Sa(\mu m)$	0,255	0,432	69,41
$Sq(\mu m)$	0,325	0,562	72,92
$Sds(p/mm^2)$	106385	170404	60,18
$Str$	0,124	0,129	4,03
$Sdq(mm/mm)$	0,24	0,287	19,58
$Scs(1/mm)$	0,69	0,792	14,78
$Sdr(\%)$	2,75	3,8	381,81
$Sbi$	1,97	1,08	-45,18
$Svi$	0,156	0,154	-1,28
$Sci$	1,29	1,33	3,10
$Sk(\mu m)$	0,606	0,921	51,98
$Spk(\mu m)$	0,229	0,486	112,23
$Svk(\mu m)$	0,335	0,606	80,90
$Sr1(\%)$	10,3	9,74	-5,44
$Sr2(\%)$	88,1	84,6	-3,97
% de material nos vales	11,9	15,9	33,61
$\Psi$	4,80	5,74	19,58

Tabela 4: Parâmetros de textura superficial obtidos para as superfícies não desgastada e desgastada do molar

centrando mais material em sua região (33%). Porém, nota-se que para os picos houve um aumento bastante superior de amplitude (Spk 112% maior) mantendo basicamente a mesma porcentagem de material. Isso sugere que além de ter havido arrancamento nos vales, a quebra das porções superiores foi mais severa, resultando em um crescimento na densidade de picos com projeções mais afiadas (crescimento do Sds e Ssc).

Com o aumento do Sdq, a superfície de uma maneira geral tornou-se mais angulosa, ou seja o desgaste também danificou o núcleo da rugosidade. Tudo isso contribuiu para que o índice de superfície de contato, Sbi, se reduzisse bastante.

Novamente as condições de contato tornaram-se menos elástica. Deparamo-nos com uma situação bastante crítica, pois além de piorar as condições de contato e a capacidade de carga, não houve aumento da capacidade de retenção de saliva. Isto pode ser observado até mesmo por uma comparação visual entre as imagens obtidas para as superfícies não-desgastada e desgastada (FIG. 67 e 69).

É importante lembrar que neste dente, a área varrida foi menor e por isso o filtro utilizado para separar o perfil de rugosidade também foi menor, 0,05mm. A escala de irregularidade avaliada pode ter limitado a interpretação do mecanismo ocorrido.

#### 4.5.5 Microscopia eletrônica de varredura

Para o molar, a foto obtida via MEV da superfície não desgastada (FIG.75 confirma a presença das periquimácias (observe as linhas claras). Embora não seja possível perceber

se o padrão da textura é ainda anisotrópico na superfície desgastada, como foi sugerido pela análise do parâmetro Str na seção 4.5.4, fica claro que houve aumento das amplitudes das irregularidades deixando um aspecto muito mais irregular à superfície, conforme sugerido pela análise do parâmetros de amplitude na mesma seção.

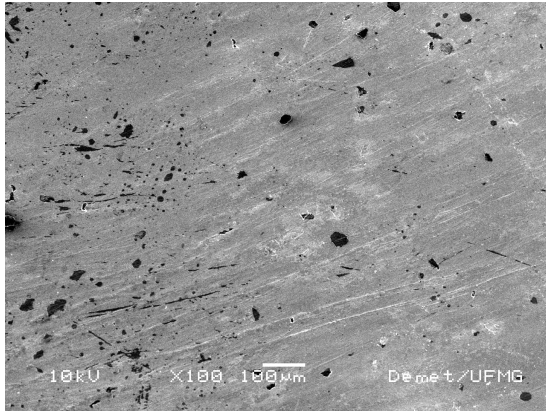


Figura 75: Superfície não desgastada do molar ampliada 100 vezes

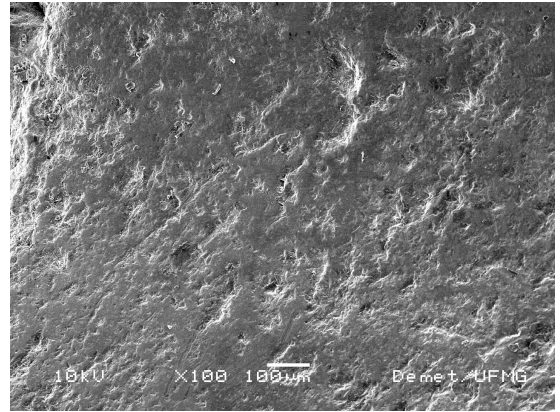


Figura 76: Superfície desgastada do molar ampliada 100 vezes

## 4.6 Réplicas

Conforme indicado na seção 3.2.5 do capítulo 3, foram feitas réplicas de dois pré-molares. As áreas investigadas foram as vestibulares. O primeiro dente corresponde ao mesmo pré-molar para o qual foi avaliado o comportamento ao desgaste (seção 4.4).

### 4.6.1 Superfícies medidas para a primeira réplica

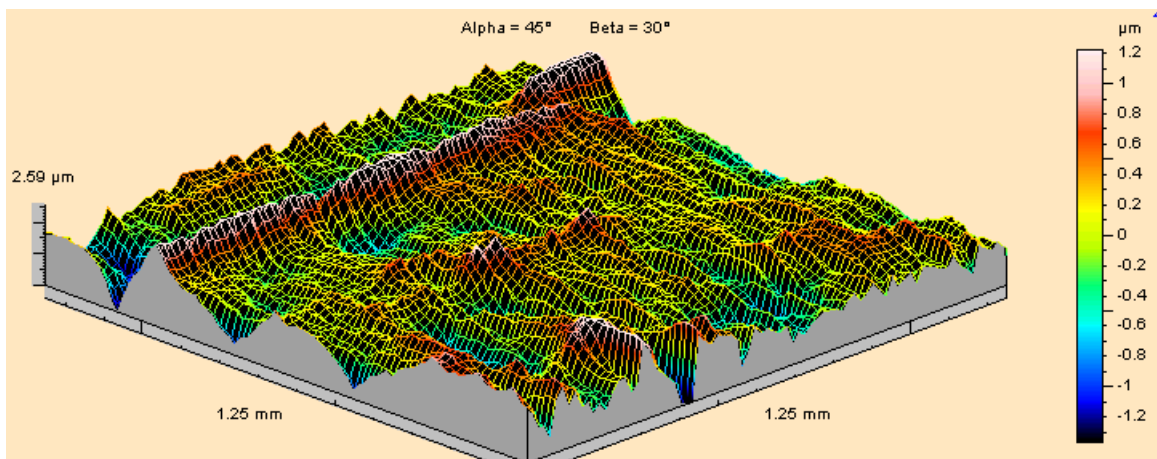


Figura 77: Perfil de rugosidade da superfície do primeiro pré-molar a ser copiado

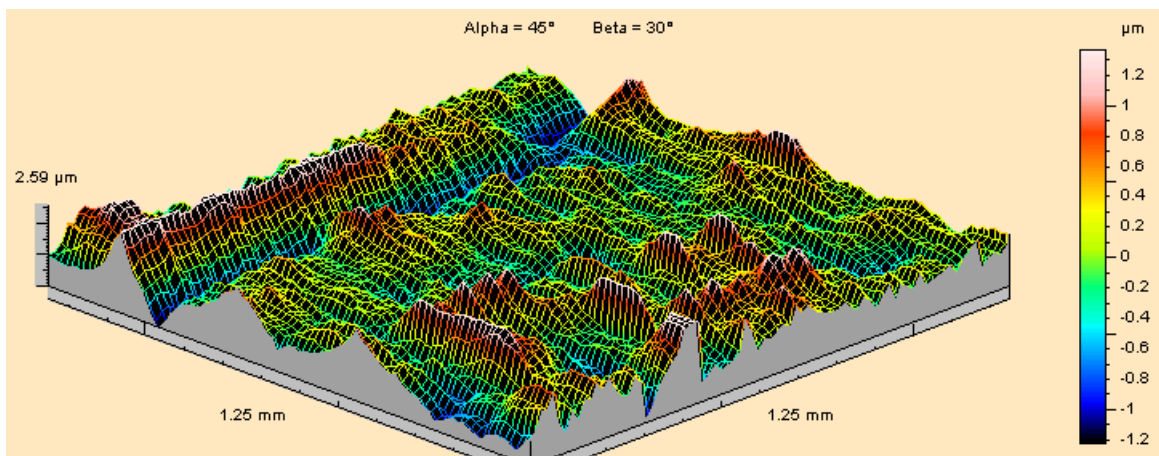


Figura 78: Perfil de rugosidade, invertido em relação à linha média, da superfície do primeiro dente a ser copiado

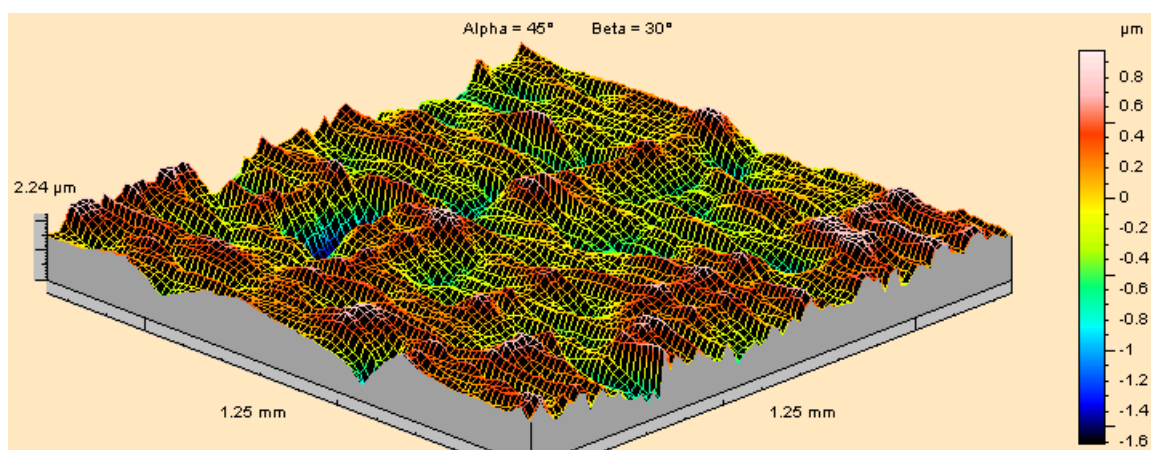


Figura 79: Perfil de rugosidade da superfície da primeira réplica

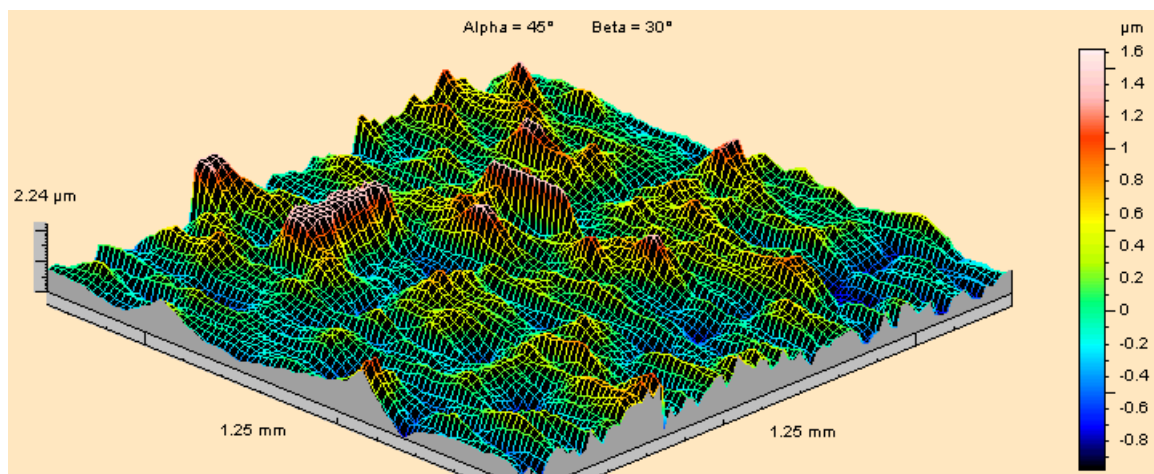


Figura 80: Perfil de rugosidade, invertido em relação à linha média, da primeira réplica

### 4.6.2 Superfícies medidas para a segunda réplica

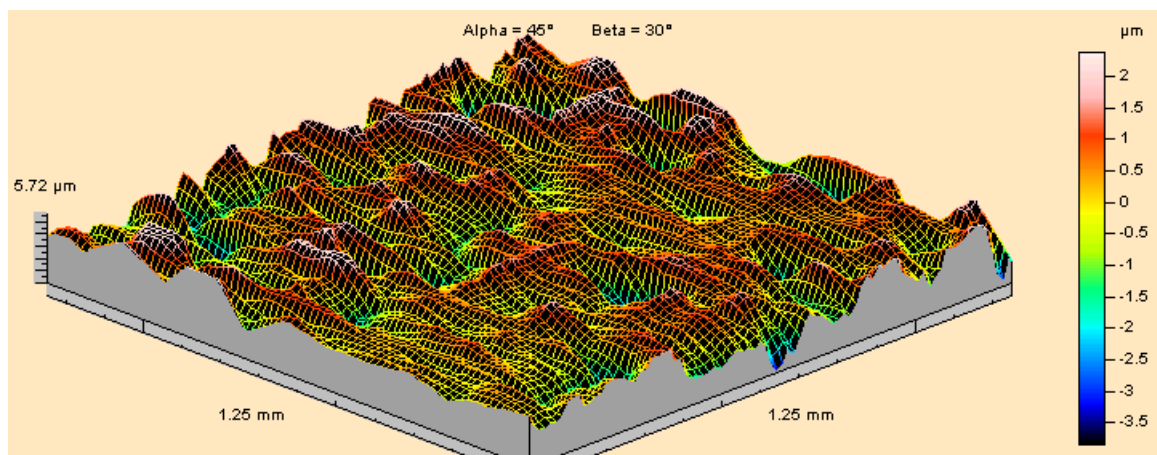


Figura 81: Perfil de rugosidade da superfície do segundo dente a ser copiado

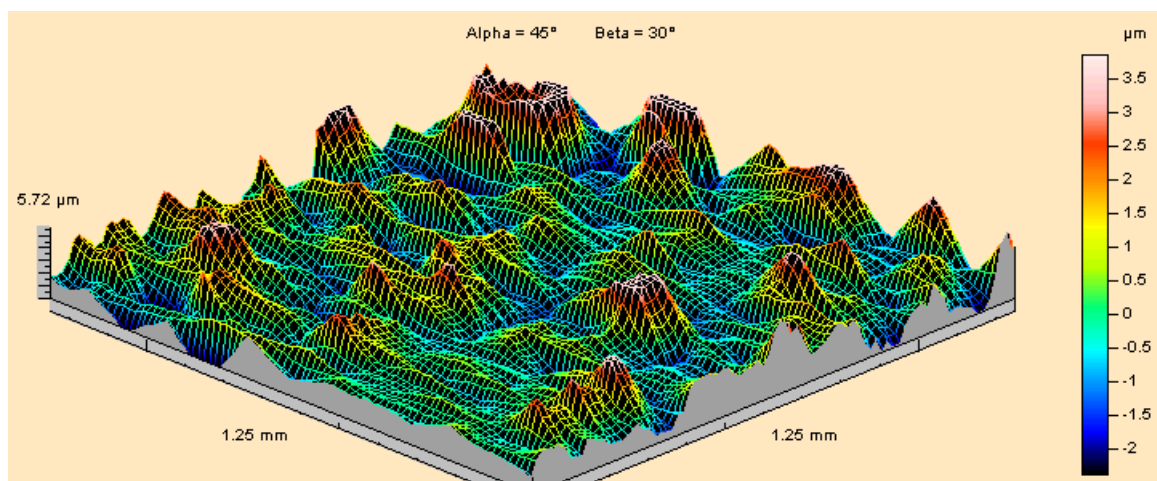


Figura 82: Perfil de rugosidade, invertido em relação à linha média, da superfície do segundo dente a ser copiado

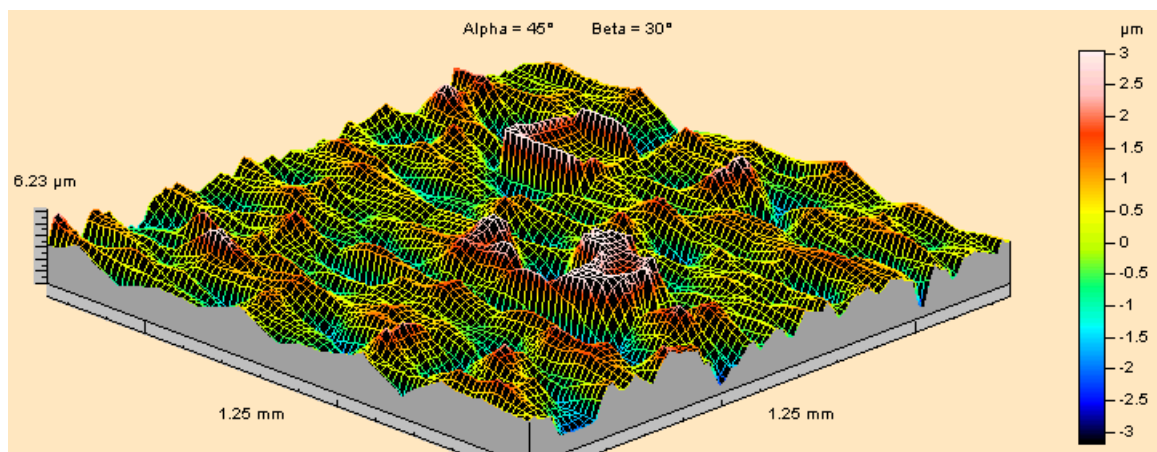


Figura 83: Perfil de rugosidade da superfície da segunda réplica

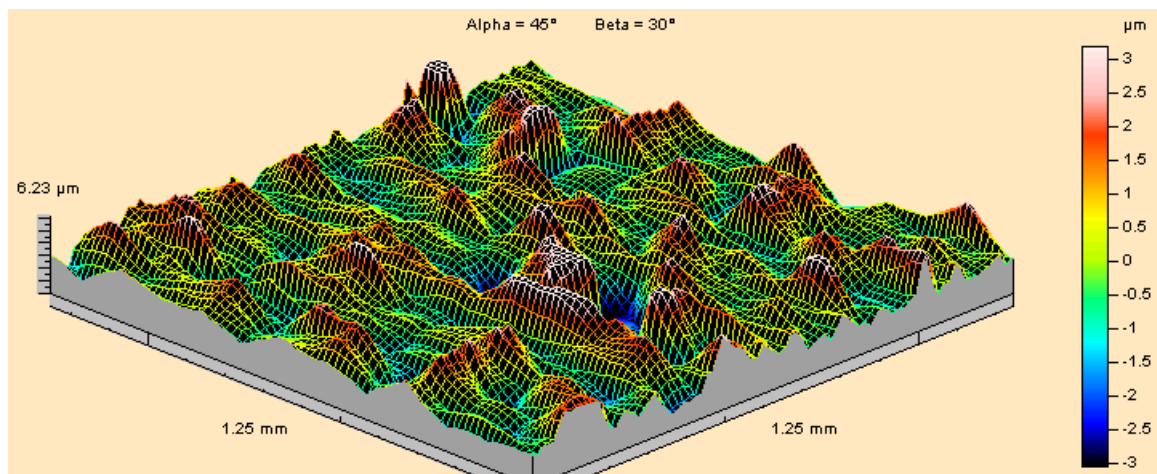


Figura 84: Perfil de rugosidade, invertido em relação à linha média, da segunda réplica

### 4.6.3 Justificativa de corte

Para o primeiro dente já foi feita a justificativa na seção 4.4.2.

De acordo com a curva de material para a primeira réplica (FIG.85), a uma profundidade de  $0,478\mu\text{m}$  encontra-se apenas 1% de material e a uma profundidade de  $2,71\mu\text{m}$  já se encontra 99% do material, ou seja, numa escala de 0 a  $4,01\mu\text{m}$ , apenas 2% de material contribuem com 44% das alturas de irregularidades.

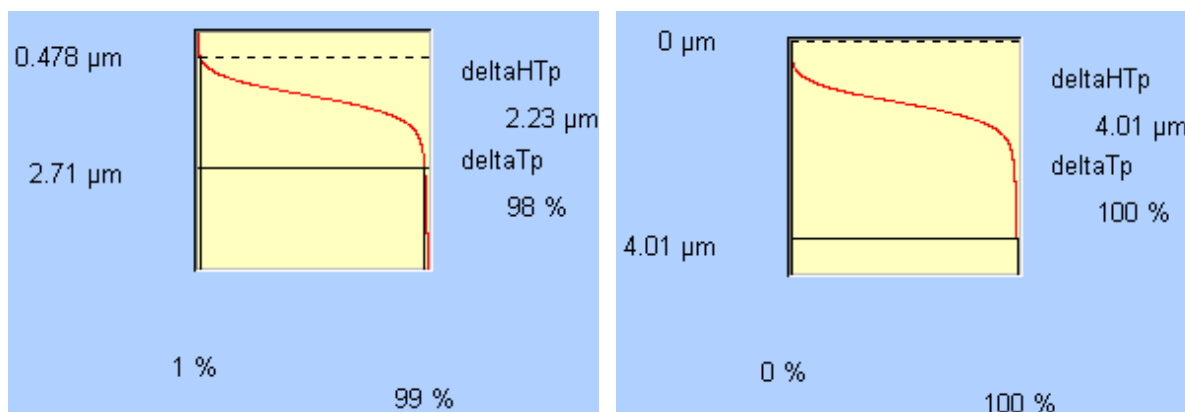


Figura 85: Curva de material da primeira réplica

Para o segundo dente a curva de material (FIG. 86) indica que a uma profundidade de  $2,8\mu\text{m}$  encontra-se apenas 1% de material e a uma profundidade de  $8,55\mu\text{m}$  já se encontra 99% do material, ou seja, numa escala de 0 a  $12,8\mu\text{m}$ , apenas 2% de material contribuem com 55% das alturas de irregularidades.

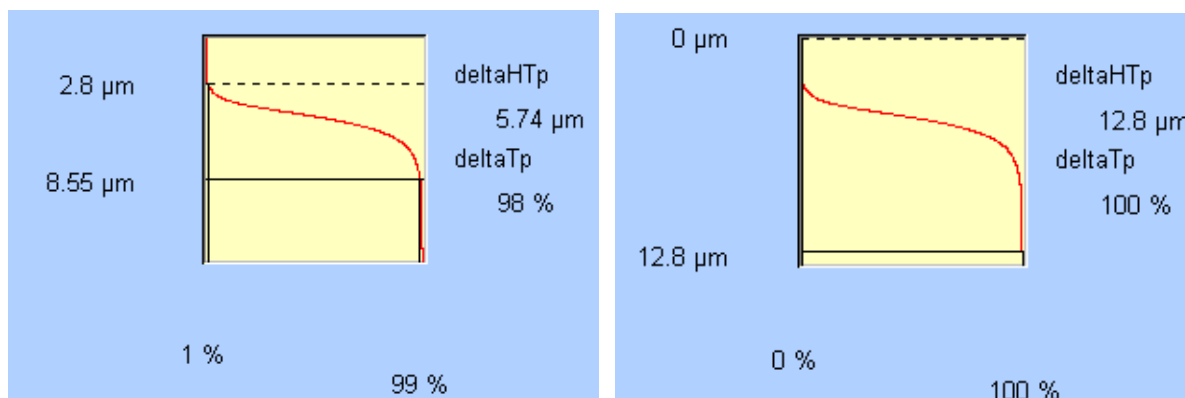


Figura 86: Curva de material do segundo dente

Já para a segunda réplica, a curva de material (FIG. 87) indica que a uma profundidade de  $3,82\mu\text{m}$  encontra-se apenas 1% de material e a uma profundidade de  $10\mu\text{m}$  já se encontra 99% do material, ou seja, numa escala de 0 a  $12,5\mu\text{m}$ , apenas 2% de material contribuem com 51% das alturas de irregularidades.

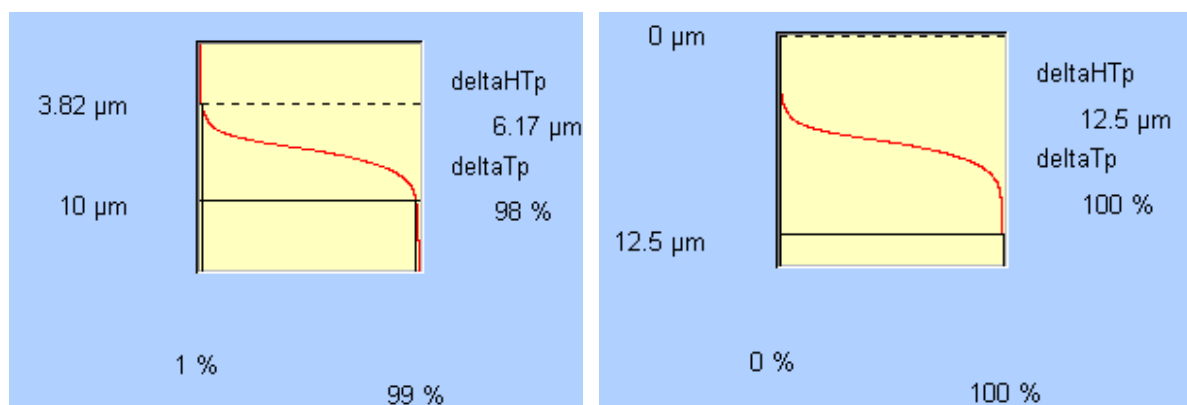


Figura 87: Curva de material da segunda réplica

## 4.7 Parâmetros de textura superficial

Filtro $\lambda_c = 0,25mm$	Primeiro dente	Primeira réplica	%
$Sa(\mu m)$	0,336	0,296	11,90
$Sq(\mu m)$	0,452	0,391	13,50
$Sds(p/mm^2)$	7498	7321	2,36
$Str$	0,295	0,602	-104,07
$Sdq(mm/mm)$	0,0586	0,0418	28,67
$Ssc(1/mm)$	0,0233	0,0261	-12,02
$Sdr(\%)$	0,171	0,0872	-49
$Sbi$	0,914	1,53	-67,40
$Svi$	0,153	0,151	-1,31
$Sci$	1,48	1,37	7,43
$Sk(\mu m)$	0,589	0,607	-3,06
$Spk(\mu m)$	0,326	0,263	-19,33
$Svk(\mu m)$	0,446	0,413	-7,40
$Sr1(\%)$	11,2	10,6	5,36
$Sr2(\%)$	87,5	87,9	-0,46

Tabela 5: Parâmetros de textura superficial obtidos para o primeiro dente e para a primeira réplica

A TAB. 5 apresenta os parâmetros de textura superficial obtidos para o primeiro dente e para a primeira réplica.

A TAB. 6 apresenta os parâmetros de textura superficial obtidos para o segundo dente e para a segunda réplica.



Filtro $\lambda_c = 0,25mm$	Segundo dente	Segunda réplica	%
$Sa(\mu m)$	0,807	0,831	2,97
$Sq(\mu m)$	1,06	1,1	3,77
$Sds(p/mm^2)$	7718	7345	-4,83
$Str$	0,559	0,519	-7,15
$Sdq(mm/mm)$	0,0945	0,0876	-7,30
$Ssc(1/mm)$	0,0455	0,0455	0
$Sdr(\%)$	0,437	0,373	-14,64
$Sbi$	1,47	0,822	-44,08
$Svi$	0,17	0,141	-17,05
$Sci$	1,22	1,45	18,85
$Sk(\mu m)$	1,59	1,95	22,64
$Spk(\mu m)$	0,72	1,06	47,22
$Svk(\mu m)$	1,15	1,27	10,43
$Sr1(\%)$	9,46	9,9	4,65
$Sr2(\%)$	86,4	87	0,69

Tabela 6: Parâmetros de textura superficial obtidos para o segundo dente e para a segunda réplica

#### 4.7.1 Discussão dos parâmetros

Observa-se que para as duas réplicas houve boa reprodutibilidade dos parâmetros que indicam as concentrações de material nas regiões de picos e vales,  $Sr1$  e  $Sr2$ , aspectos gerais das asperezas como densidade de picos e angulação,  $Sds$  e  $Ssc$ , e índices de retenção de fluido,  $Svi$  e  $Sci$ .

Os parâmetros de amplitude funcionam muito bem para os vales e bem para o núcleo, porém apresentaram péssimos resultados para os picos, assim como o índice de superfície de contato,  $Sbi$ , que é um parâmetro muito sensível a asperezas isoladas.

Outros parâmetros foram reprodutivos para uma réplica, mas não foram para a outra, como o  $Sdq$  e o  $Str$ .

Para se ter um resultado conclusivo seria necessário produzir novas réplicas, variando as técnicas e realizando mais ensaios.

# 5 CONCLUSÕES

## 5.1 Conclusões

Através das técnicas de perfilometria e microscopia eletrônica de varredura, a textura superficial de amostras de esmalte dentário foi analisada, tanto para o material em seu estado natural quanto desgastado. Com isso, além de caracterizar a superfície geometricamente, tentou-se compreender os mecanismos de desgaste atuantes no bruxismo, através da correlação entre as solicitações conhecidas, tais como movimento e carga das superfícies oclusais, e as mudanças ocorridas nesta geometria. Avaliou-se a aplicabilidade do uso de réplicas, com o intuito de se criar uma metodologia *in vivo*, e ainda, realizou-se os ensaios com um dente de natureza preservada, objetivando-se estabelecer um padrão de textura para o esmalte, servindo de base para comparação entre este e os materiais de restauração desenvolvidos.

As conclusões deste estudo estão relacionadas a seguir.

É possível identificar através dos resultados da perfilometria o padrão incremental de formação do esmalte, refletido pela presença das periquimácias, e como ele é afetado pelo desgaste.

A caracterização da superfície natural livre de desgaste indica haver uma distribuição simétrica entre picos e vales, em relação tanto às amplitudes das irregularidades quanto às concentrações de material. Portanto o esmalte é bem representado por uma superfície gaussiana e pode ser aplicado aos modelos clássicos de contato. A presença das ondulações representadas pelas periquimácias na superfície do esmalte, conforme ilustrado para o siso, parece ser fator determinante na interpretação dos resultados para dentes em adultos.

Havendo predominância dos agentes químicos, ligados diretamente à dieta alimentar, os vales tendem a ficar mais profundos em relação aos picos, enquanto que esta diferença torna-se mais amena quando predominam os fatores abrasivos.

Os resultados sugerem que os mecanismos de desgaste por fratura frágil são fortemente relacionados com os padrões de movimento das superfícies oclusais e com as funções dos dentes. Uma vez que as cargas de mordida são maiores, tanto na oclusão e mastigação quanto na parafunção, para os dentes posteriores do que para os anteriores (CIMINI, 2000), o grau de severidade naqueles é maior. Isto foi constatado na análise do molar, que se mostrou como o dente mais danificado. Além disso, nos dentes anteriores, o movimento

que tende a desgastá-los horizontalmente é transversal às periquimácias que se encontram arranjadas concêntricamente em torno do eixo longitudinal do dente, oferecendo maior resistência ao desgaste. Tal fato foi observado no caso do canino, para o qual o desgaste pareceu mais brando.

As condições de contato e capacidade de retenção de saliva também influenciam no grau de severidade do desgaste. O molar, dente que apresentava condições de contato menos elásticas e menor capacidade de retenção de saliva, foi o que apresentou maior grau de desgaste.

Através da avaliação via MEV teve-se um enfoque voltado para o padrão de textura em relação à sua anisotropia, não sendo possível identificar aspectos funcionais da superfície. Conclui-se que tal procedimento pode ser melhor explorado, seja em relação às técnicas de preparação das amostras ou aos graus de ampliação das fotografias, pois a correlação feita com a perfilometria, ainda que limitada, ajudou na interpretação dos dados.

Quanto ao uso das réplicas, constatou-se que as regiões dos picos apresentaram muitas falhas, enquanto que os parâmetros relacionados com os vales foram bem reproduzidos. Tal problema pode estar relacionado com a observação de formação de pequenas bolhas de ar em sua superfície, o que torna o material frágil à passagem da ponta. Ou ainda, é possível que no momento de separação dos componentes, a sílica tenha perdido material para o dente e posteriormente para o epóxi. Estas hipóteses devem ser cuidadosamente analisadas como o intuito de se tornar a técnica de reprodução mais precisa. Existe ainda a necessidade de se testar novos materiais, ou de se ajustar o tempo de presa dos mesmos, porém, o que fica claro é que justifica-se a aplicabilidade da réplica, uma vez que o seu uso possibilita uma nova metodologia de avaliação *in vivo*.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Através dos dados geométricos disponibilizados pela perfilometria, pode-se criar um modelo numérico parametrizado que simule as condições de contato das superfícies oclusais dentárias, de modo a mapear e prever os mecanismos de desgaste atuantes. A partir de modelo simplificado da geometria das superfícies envolvidas, gerado pela perfilometria, pode-se realizar estudos numéricos de simulação do contato entre o esmalte dentário, no caso de dois dentes hígidos, ou entre esmalte e biomateriais restauradores. O modelo desenvolvido pode incorporar níveis distintos de refinamento e ser aferido através de análises qualitativas, onde seria feito um acompanhamento clínico de pacientes bruxômanos, em conjunto com equipe da Faculdade de Odontologia da UFMG, e quantitativas através dos experimentos feitos com réplicas destes pacientes ao longo do tempo. O objetivo deste trabalho seria contribuir de maneira efetiva para a pesquisa e desenvolvimento de biomateriais e para a consolidação do caráter multidisciplinar do tema, conjugando os esforços de especialistas em análise numérica, clínica e experimental, das áreas de materiais, análise de tensões, processamento numérico e odontologia.

## *Bibliografia*

- ARITA, C. A. et al. Alterações provocadas pelo bruxismo sobre o sistema estomatognático - a importância do seu diagnóstico. *Revista Gaúcha de Odontologia*, v. 38, n. 4, p. 257–261, 1990.
- ARNOLD, M. Bruxism and the occlusion. *Dental Clinics of North America*, v. 25, n. 3, p. 395–407, 1981.
- ATTANASIO, R. Nocturnal bruxism and its clinical management. *Dental Clinics of North America*, v. 35, n. 1, p. 245–252, 1991.
- BERRY, D. C. The eruption and occlusion of teeth. In: POOLE, D. F. G.; STACK, M. V. (Ed.). *Proceedings of the twenty-seventh symposium of the colston research society*. [S.l.]: Butterworths, 1975. p. 146–155.
- BEYNON, A. D. Replication technique for studying microstructure. *Scanning microsc.*, v. 1, p. 663–669, 1954.
- BHASKAR, S. N. *Histologia e Embriologia Oral de Orban*. [S.l.]: Artes Médicas, 1989.
- BOYDE, A. Dependence of rate of physical erosion on orientation and density in mineralised tissues. *Anat. Embryol.*, n. 170, p. 57–62, 1970.
- CARLSSON, G. E.; JOHANSSON, A.; LUNDQVIST, S. Occlusal wear. a follow-up study of 18 subjects with extensively worn dentitions. *Acta Odontol. Scand.*, v. 43, p. 83–90, 1985.
- CARVALHO, G. P. de. Anatomia odontológica. *Disponível em: [http://www.carvalho.odo.br/anatomia/dentes\\_perman.htm](http://www.carvalho.odo.br/anatomia/dentes_perman.htm)*, Acesso em 15 fev. 2004.
- CASH, R. G. Bruxism in children: review of literature. *J. Pedod.*, v. 12, p. 107–127, 1988.
- CIMINI, C. A. J. et al. Loads in teeth - a critical review. In: METMBS'2000 (Ed.). *Proceedings of the METMBS'2000 - The 2000 International Conference on Mathematics and Engineering Techniques in Medicine and Biological Sciences*. Las Vegas, NV, EUA: CSREA Press, 2000. II, p. 649–655.
- COLQUITT, T. The sleep-wear syndrome. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, v. 57, n. 1, p. 33–41, 1987.
- CRAIG, R. G.; PEYTON, F. A. Compressive properties of enamel, dental cements and gold. *Journal of Dental Research*, v. 40, n. 5, p. 936–45, 1961.

- DAHL, B. L.; FLOYSTRAND, F.; KARLSEN, K. Pathologic attrition and maximal bite force. *Journal of Oral Rehabilitation*, v. 12, p. 337–342, 1985.
- DELONG, R.; PINTADO, M. R.; DOUGLAS, W. H. Evaluation of impression methods using quantitative surface analysis. *Journal of Dental Research*, v. 73, p. 409, 1994.
- DELONG, R.; PINTADO, M.; DOUGLAS, W. H. Measurement of change in surface contour by computer graphics. *Dent. Mater.*, v. 1, p. 27–30, 1985.
- GLAROS, A. G. Incidence of diurnal and nocturnal bruxism. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, v. 45, n. 5, p. 545–549, 1981.
- GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. B. P. *Contact of nominally flat surfaces*. Norwalk, Connecticut, U.S.A., 1966.
- GRIPPO, J. O.; SIMRING, M. Dental 'erosion' revisited. *JADA*, v. 126, p. 619, 1995.
- HUTCHINGS, I. M. *Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials*. London: Edward Arnold, 1992.
- JANKELSON, B. Physiology of human dental occlusion. *J. Am. Dent. Assoc.*, v. 50, p. 664–680, 1955.
- KNEGT, F. V. de. *Desgaste em recobrimentos duplex e monocamada a base de WC-Co*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.
- LAMBRECHTS, P. et al. Quantitative in vivo wear of human enamel. *Journal of Dental Research*, v. 68, n. 12, p. 1752–1754, 1989.
- LAMBRECHTS, P.; VANHERLE, G.; DAVIDSON, C. L. A universal and accurate replica technique for scanning electron microscope study in clinical dentistry. *Microscopica Acta*, n. 85, p. 45–58, 1981.
- LAMBRECHTS, P. et al. Quantitative evaluation of the wear resistance of posterior dental restorations. a new three-dimensional measuring technique. *Journal of Dental Research*, n. 12, p. 252–267, 1984.
- LAVELLE, C. L. B. Analysis of attrition in adult human molars. *J. Dent. Res.*, n. 49, p. 822–828, 1970.
- LEE, I. K. et al. Evaluation of factors affecting the accuracy of impressions using quantitative surface analysis. *Operative Dentistry*, v. 20, p. 246–252, 1995.
- LINDQVIST, B. Bruxism in children. *Odont. Rev.*, v. 22, p. 413–424, 1971.
- MAIR, L. H. et al. Wear: Mechanisms, manifestation and measurement. report of a workshop. *Journal of Dentistry*, v. 24, n. 1-2, p. 141–148, 1996.
- MIKIC, B. B. Thermal contact conductance: theoretical considerations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 205, n. 17, p. 416–417, 1974.
- MILICIC, A.; GAZI-COKLICA, V.; SLAJ, M. Dental attrition in preschool children. *Acta Stomatol. Croat.*, v. 21, p. 271–276, 1987.

- MOHL, N. D. et al. *Fundamentos de Oclusão*. [S.l.]: Quintessence, 1991. 449 p.
- MUMMERY, L. *Surface Texture Analysis - The Handbook*. [S.l.]: Hommelwerke GmbH, 1992.
- MURPHY, T. The changing pattern of dentine exposure in human tooth attrition. *Am. J. Phys. Anthropol*, n. 17, p. 167–178, 1959.
- NADLER, S. C. Bruxism, a classification: critical review. *The Journal of the American Dental Association*, v. 54, p. 615–622, 1957.
- NYSTRÖM, M. et al. Development of horizontal tooth wear in maxillary anterior teeth from five to 18 years of age. *Journal of Dental Research*, v. 69, p. 1765, 1990.
- O'BRIEN, W. J. *Dental Materials and Their Selection*. [S.l.]: Quintessence Publishing Co, 1997.
- OH, W. suck; DELONG, R.; ANUSAVICE, K. Factors affecting enamel and ceramic wear: a literature review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, v. 87, p. 451–9, 2002.
- OKESON, J. P. et al. Nocturnal bruxism events: a report of normative data and cardiovascular response. *Journal of Oral Rehabilitation*, v. 21, p. 623–630, 1994.
- OKESON, J. P. *Fundamentos de oclusão e desordens temporomandibulares*. [S.l.]: Artes Médicas, 1992. 449 p.
- PAVONE, B. W. Bruxism and its effect on the natural teeth. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, v. 53, n. 5, p. 692–696, 1985.
- PETERS, A. R.; GROSS, S. G. *Clinical management of temporomandibular disorders and orofacial pain*. [S.l.]: Quintessence, 1995. 368 p.
- PETERS, M. C. R. B. et al. Comparison of two measurement techniques for clinical wear. *Journal of Dentistry*, v. 27, p. 479–485, 1999.
- PINTADO, M. R. et al. Variation in tooth wear in young adults over a two-year period. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, v. 77, p. 313–20, 1997.
- PINTADO, M. R.; CONRY, J. P.; CLARK, G. T. Measurement of sealant volume in vivo using image-processing technology. *Quintessence Int.*, v. 19, p. 613–7, 1988.
- PÖLLMANN, L.; BERGER, F.; PÖLLMANN, B. Age and dental abrasion. *Gerodontics*, v. 3, p. 94–96, 1987.
- POWERS, J. M.; CRAIG, R. G.; LUDEMA, K. C. Frictional behavior and surface failure of human enamel. *J. Dent. Res.*, n. 52, p. 1327–1331, 1973.
- PRECISION DEVICES, INC. *Surface Profile Parameters*. Disponível em: <http://www.predev.com/smg/parameters.htm>, Acesso em 15 fev. 2004.
- RICKETTS, R. M. Occlusion - the medium of dentistry. *J. Prosthet. Dent.*, v. 21, p. 39–60, 1969.

- ROSE, J. J. A replication technique for scanning electron microscopy: applications for anthropologists. *Am. J. Phys. Anthropol.*, v. 62, p. 255–261, 1983.
- SARIKAYA, M. et al. Biomimetics: Nanomechanical design of materials. In: 15TH ASCE ENGINEERING MECHANICS CONFERENCE. *Columbia University*. [S.l.], 2002.
- SCOTT, E. C. Replica production for scanning electron microscopy: a test of materials suitable for use in field settings. *J. Microsc.*, v. 125, p. 337–341, 1982.
- SHORTALL, A. C. Potential countersample materials for in vitro simulation wear testing. *Dental Materials*, v. 18, p. 246–254, 2002.
- SMITH, B. G. N. Tooth wear: aetiology and diagnosis. *Dent. Update*, v. 16, p. 204–212, 1989.
- STOUT, K. J. The development of methods for the characterization of roughness in 3 dimensions. *Comission of the european communities*, BCR-3374/1/0/170 90 2, 1993.
- TABOR, D. *Hardness of metals*. [S.l.: s.n.], 1951.
- TEAFORD, M. F.; TYLEND, C. A. A. New approach to the study of toothwear. *Journal of Dental Research*, v. 70, p. 204, 1991.
- WASSEL, R. W.; MCCABE, J. F.; WALLS, A. W. G. Characteristics in a two-body wear test. *Dental Materials*, v. 10, p. 269–274, 1994.
- WASSEL, R. W.; MCCABE, J. F.; WALLS, A. W. G. A two-body frictional wear test. *J. Dent. Res.*, v. 73, p. 1546–1553, 1994.
- WEST, N. X. et al. A method to measure clinical erosion: the effect of orange juice consumption on erosion of enamel. *Journal of Dentistry*, v. 26, n. 4, p. 329–335, 1998.
- WHITEHEAD, S. A. et al. Changes of surface texture of enamel in vivo. *Journal of Oral Rehabilitation*, v. 24, p. 449–453, 1997.
- WHITEHOUSE, D. J.; ARCHARD, J. F. The properties of random surfaces of significance in their contact. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, v. 316, n. A, p. 97–121, 1970.
- XHONGA, F. A. Bruxism and its effect on the teeth. *Journal of Oral Rehabilitation*, v. 4, p. 65–76, 1977.