



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Odontologia de Piracicaba



C1
R-429

Paulo Vinícius Soares

Cirurgião Dentista

Análise do complexo tensão-deformação e mecanismo de falha de pré-molares superiores com diferentes morfologias radiculares e redução seqüencial de estrutura dental

Tese apresentada à Faculdade de Odontologia de Piracicaba, da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do Título de Doutor em Clínica Odontológica – Área de concentração em Dentística.

Orientador: Prof. Dr. Luis Roberto Marcondes Martins

Piracicaba

2008

Este exemplar foi devidamente corrigido,
de acordo com a Resolução CCPG 036/83.
Assinatura do Orientador:
Prof. Dr. Luis Roberto Marcondes Martins
Departamento Odontologia Restauradora
Matrícula - 11560-6
FOP / UNICAMP

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA FACULDADE DE ODONTOLOGIA DE PIRACICABA**

Bibliotecária: Marilene Girello – CRB-8^a. / 6159

So11a Soares, Paulo Vinícius.
Análise do complexo tensão-deformação e mecanismo de falha de pré-molares superiores com diferentes morfologias radiculares e redução seqüencial de estrutura dental. / Paulo Vinícius Soares. -- Piracicaba, SP : [s.n.], 2008.

Orientador: Luis Roberto Marcondes Martins.
Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Odontologia de Piracicaba.

1. Fratura. 2. Dentes - Raízes. 3. Restauração (Odontologia). I. Martins, Luis Roberto Marcondes. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Odontologia de Piracicaba. III. Título.
(mg/fop)

Título em Inglês: Analysis of stress-strain complex and failure mechanism for maxillary premolars with different root morphology and sequential loss of dental structure

Palavras-chave em Inglês (Keywords): 1. Fracture. 2. Teeth roots. 3. Restoration (Dentistry)

Área de Concentração: Dentística

Titulação: Doutor em Clínica Odontológica

Banca Examinadora: Luis Roberto Marcondes Martins, Carlos José Soares, Luis Alexandre Maffei Sartini Paulillo, Flávio Domingues das Neves, Rafael Yague Ballester

Data da Defesa: 25-08-2008

Programa de Pós-Graduação em Clínica Odontológica



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ODONTOLOGIA DE PIRACICABA



A Comissão Julgadora dos trabalhos de Defesa de Tese de DOUTORADO, em sessão pública realizada em 25 de Agosto de 2008, considerou o candidato PAULO VINÍCIUS SOARES aprovado.

PROF. DR. LUIS ROBERTO MARCONDES MARTINS

PROF. DR. CARLOS JOSÉ SOARES

PROF. DR. LUIS ALEXANDRE MAFFÉI SARTINI PAULILLO

PROF. DR. RAFAEL WAGÜE BALLESTER

PROF. DR. FLÁVIO DOMINGUES DAS NEVES

Dedicatória

À Deus,

Mais uma vez o Senhor esteve a minha frente, me guiando, iluminando meus caminhos. Mais uma vez, só tenho que agradecer, pelo caminho trilhado, pelas pessoas maravilhosas que colocastes ao meu lado. Hoje realizo um sonho, sonho que tantas vezes fui confortado e encorajado por ti. Olhai por nós, pois precisamos de ti sempre.

À minha família,

Honestidade e dignidade são princípios que sustentam nossa família graças ao esforço de vocês, meu pai Paulo e minha mãe Cida. Amo vocês, levarei sempre comigo as palavras de apoio e incentivo que foram e serão sempre fundamentais para mim. Esta conquista é só mais um fruto da luta e do trabalho que vocês dois juntos conquistaram. Aos meus irmãos Carol, João, Clara e Rita, só quero dizer que me orgulho em tê-los do meu lado como irmãos. Vi cada um crescer, hoje são todos universitários, cada um com suas características especiais. Desejo e vou sempre lutar para que realizem seus sonhos e objetivos, amo vocês.

À Lorena,

Minha amiga, minha companheira, meu amor. Nem a distância nos distanciou, se estive ausente em algum momento, estive por nós dois. Te levo sempre comigo, pois sei que você também se preocupa conosco. Acredito no nosso amor, conte comigo sempre. Te amo.

Agradecimentos especiais

Ao Professor Luis Roberto,

Primeiramente, obrigado pela confiança depositada em mim. Você é um exemplo de professor, de pai e de amigo. Guardo comigo conselhos e momentos de descontração que nunca esquecerei. Agradeço a Deus por ter te conhecido, ter sido seu aluno, obrigado por frequentar a sua casa, obrigado pela companhia agradável juntamente com sua esposa Suzy. Parabéns pela família maravilhosa que você constituiu, foi um prazer enorme conhecer seus filhos, reflexos do pai que têm. Conte comigo sempre Beto, inicio uma vida de trabalho, e serei muito grato se puder continuar trabalhando junto com você. Obrigado.

Ao Professor Carlos,

Meu segundo pai. Meu professor, meu orientador, meu conselheiro, meu amigo. Em todo lugar que vou escuto de diversas pessoas a vontade de trabalhar ao seu lado. Tenho muito orgulho disso. Temos a mesma origem, de gente trabalhadora, de família que se une em dificuldades e alegrias, por isso tenho esperança, me espelho em você. Às vezes paro para pensar, um filme da minha vida passa, e hoje eu entendo o quanto seu apoio, seu direcionamentos, seus conselhos foram importantes não só para mim, mas também para minha família. Você será sempre bem vindo na minha casa, e te agradeço pelos momentos maravilhosos, senão os mais importantes, de importantes decisões, que vivi na sua casa juntamente com sua família. Que Deus continue te iluminando, sua família, seus filhos, e tentarei sempre dedicar-me ao máximo na carreira que você me ajudou a conquistar, e estar ao seu lado será um prazer, realização de um sonho. Obrigado.

Aos meus amigos Paulo César e Murilo,

Meus irmãos. Amigos a tanto tempo, companheiros de conquistas, de lutas, de viagens. Torço por cada um de vocês conquistarem seus espaços, como bons professores que são. Obrigado por estarem ao meu lado, contem sempre comigo, é uma honra trabalhar junto com vocês.

Às minhas amigas Priscilla e Veridiana,

Uma a maior mãe da Dentística da UFU, a outra nossa irmã querida. Sou seu fã Priscilla por tudo que você faz, pelo bem, pela harmonia, pela amizade. O Marcelo e a Bruninha têm um exemplo maravilhoso de pai e mãe, de família. Obrigado por participar da sua família maravilhosa. A você Veridiana, te desejo muito sucesso, obrigado por estar ao meu lado como amiga e colega, que Deus ilumine vocês sempre.

Aos Professores Luis Alexandre e Flávio,

Obrigado pelos ensinamentos, pelos conselhos, pelos momentos juntos dentro e fora da Faculdade. Levo comigo o exemplo de vocês como professores e educadores, a amizade e o desejo que continuar trabalhando com vocês. Obrigado.

Aos Amigos do CenPRA Jorge, Pedro, André, Daniel, Viviane, Lázaro, Ailton,

Sem a ajuda e dedicação de vocês eu não teria condições de terminar este trabalho. Obrigado pela atenção, pelos momentos de trabalho intenso sem descanso, pelas brincadeiras que enganavam o tempo na frente do computador. Vocês são exemplos de que se pode fazer pesquisa de alta qualidade e aplicabilidade, mesmo com as dificuldades financeiras e limitações do nosso país. Obrigado.

Aos Professores Alfredo, Roberto, Paulo Quagliatto, Flávio, Adérito, Ricardo, Denildo,

Tenho orgulho de ter sido aluno de vocês e graduando de uma instituição que vocês trilharam e conquistaram juntos. É uma honra estar ao lado de vocês, estarei sempre à disposição para trabalhar e dar continuidade ao que vocês conquistaram. Obrigado.

Aos Amigos e Professores Paulo Simamoto, Hugo, Rodrigo,

O tempo passou e fica uma amizade sólida e incontestável. Obrigado por estarem ao meu lado, muito sucesso a vocês como professores, como marido e como pai.

Ao Amigo André Luis, Queridos amigos de turma Cecília, Larissa, Rodrigo, Cristiane e todos os amigos da FOP Débora, Adriano, Lurdinha, Taiane, Guilliana, Marina, Maria, Cíntia,

Eu tenho certeza que me esqueci de muitos, mas levo no meu coração o carinho de cada um de vocês, desde o dia que cheguei na FOP até nos momentos de reencontro muito sucesso a todos.

Aos meus amigos da UFU Gisele, Carol Guimarães, Carol Assaf, Luis Raposo, Bruno Barreto, Bruno Reis, alunos da IC, alunos do Mestrado,

Obrigado por compartilharem comigo esta conquista. Reconheço a ajuda e apoio de cada um de vocês, não me esqueço dos momentos que precisei de ajuda e estiveram do meu lado. Desejo muito sucesso para vocês todos.

Aos Professores Gisele, Marcelo Giannini, Lourenço, Sinhoreti, Renata, Salum, Lovadino, Roger, Mauro,

Obrigado pela oportunidade de ter convivido com vocês e compartilhar bons momentos de discussão e de trabalho.

Aos funcionários e meus amigos Mônica e Pedro,

Quanta atenção e alegria, nos momentos de aflição, de jogar conversa fora, de conselhos. Obrigado pela oportunidade de conviver com vocês, que Deus os ilumine sempre.

Aos funcionários e meus amigos FOUFU, Nelson, Abigail, Sr. Advaldo, Zélia, Juliana, Tavares,

Obrigado pela ajuda, atenção e carinho que mesmo distantes foram importantes nesta etapa da minha vida.

Aos alunos de Curso de Graduação de Odontologia da FOP,

Obrigado pelo convívio, pela confiança durante orientações e pelos conhecimentos compartilhados durante aulas teóricas.

Agradecimentos

À Universidade Estadual de Campinas,

À Faculdade de Odontologia de Piracicaba,

Ao Programa de Pós-graduação,

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP),

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq),

À Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia,

Ao Centro de Pesquisa Renato Archer.

Epígrafe

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.”

Isaac Newton

RESUMO

Este trabalho tem avaliado o comportamento biomecânico de pré-molares superiores humanos por meio de análise da distribuição de tensões, deformação da estrutura dental e resistência à fratura, variando a morfologia radicular e o tipo de preparo cavitário. Foram selecionados 40 pré-molares superiores com dimensões coronárias semelhantes, distribuídos em 4 categorias de morfologia radicular diferentes (n=10): Uni – uniradiculares; FA – biradiculares com furca presente no terço apical da raiz; FM– biradiculares com furca presente no terço médio da raiz; FC – biradiculares com furca presente no terço cervical da raiz. Cada dente recebeu sete tipos seqüenciais de remoção de estrutura: H-hígido (controle), O- oclusal; OD- disto-oclusal, MOD- méso-ocluso-distal, MOD+A- acesso endodôntico, TE- tratamento endodôntico e RC- restauração com resina composta. O comportamento biomecânico dos dentes foi analisado de forma comparativa entre diferentes metodologias: 1) simulação computacional para análise da distribuição de tensões (método de elementos finitos), 2) ensaio laboratorial não-destrutivo para análise das deformações (método de extensometria) e 3) ensaio laboratorial destrutivo para análise da resistência a fratura (método de resistência à fratura), além da realização da classificação do padrão de fratura. Observou-se que a remoção de estrutura dental favoreceu maior acúmulo de tensões e deformação. O tipo de morfologia radicular influenciou no padrão de deformação de cúspide e face proximal, sendo a furca cervical o fator mais importante no aumento dos valores de deformação. A furca presente no terço cervical e sulcos profundos das faces proximais promoveram maior incidência de fraturas severas. Observou-se também correlação direta dos resultados encontrados nos diferentes métodos empregados.

Palavras-chave: pré-molares, elementos finitos, biomecânica, extensometria, fratura.

ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate the biomechanical behavior of restored maxillary human premolar throughout stress-strain, stress distribution analysis and fracture resistance with different root morphologies and the cavity preparation design. Forty maxillary premolars with similar coronary dimensions were selected and divided into 4 morphology categories (n=10): Uni- single rooted; FA- biradicular premolar with apical furcation; FM- biradicular premolar with medium furcation; FC- biradicular premolar with cervical furcation. Each tooth received seven treatments with structural reduction: H- sound tooth (control group), O- occlusal cavity; OD- disto-occlusal cavity; MOD- mesio-occlusal-distal cavity; MOD+A- endodontic access; TE- endodontic treatment; RC- restoration with composite resin. The biomechanical behavior of the teeth was analyzed by methodologies association: 1) Finite Element Analysis, 2) Strain-gauge method and 3) Fracture resistance test and Failure mode), and was made the fracture mode classification. It was observed that dental structure loss promotes high stress concentration inside the teeth and cuspal deflection. The root morphology influenced cusp and proximal surface strain. The cervical furcation was the main factor of strain data increase. This study showed that the association of different methodologies is an important tool for biomechanical analysis.

Keywords: premolar, finite element, biomechanical, strain-gauge test, fracture.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
3 PROPOSIÇÃO	19
4 MATERIAL E MÉTODOS	20
5 RESULTADOS	41
6 DISCUSSÃO	47
7 CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	
ANEXO	
APÊNDICE	

1 INTRODUÇÃO

A redução de estrutura dental como consequência de cárie, trauma, preparos cavitários e tratamento endodôntico influenciam negativamente na resistência à fratura do elemento dental (Mondelli et al., 1980, Eakle, 1986; Soares et al., 2004; Soares et al., 2006, Soares et al., 2008a), devido, principalmente ao enfraquecimento ou remoção das cristas marginais provocado pela extensão do preparo cavitário (Mondelli et al., 1980; Eakle, 1986) e pelo tratamento endodôntico (Reeh et al, 1989). Para reconstrução funcional e recuperação do comportamento biomecânico de pré-molares com extensas reduções de estrutura, tem sido propostas técnicas restauradoras adesivas diretas com resinas compostas, devido a capacidade de adesão às estruturas dentais (Eakle, 1986; Toparli et al., 1999; Soares et al., 2008b) e princípios de conservação máxima de estrutura durante confecção de preparos (Soares et al., 2004; Siso et al., 2007; Shahrbaef et al., 2007; Soares et al., 2008c).

Realizando estudo morfológico, Kartal et al. (1998) observaram que no grupo de primeiros pré-molares, 61,32% apresentaram duas raízes distintas e para o grupo de segundos pré-molares, este índice foi de 29,66%. Entretanto, a posição da furca em relação à coroa do dente é variável (Joseph et al., 1996). Por outro lado, estudos demográficos de fraturas catastróficas ou severas, que caracterizam as fraturas verticais de raiz, foram realizados por Tamse et al. (1999) e Cohen et al. (2006), os quais demonstraram que os pré-molares superiores são responsáveis por 38% e 23,35% das fraturas verticais em dentes posteriores, respectivamente.

No estudo das estruturas dentais e materiais restauradores, os ensaios mecânicos destrutivos são importantes meios de análise do comportamento do dente em situações de aplicação de cargas pontuais e de alta intensidade (Eakle, 1986; Soares et al., 2004; Soares et al., 2006; Soares et al., 2008b). Vários estudos têm empregado esta metodologia para análise da resistência à fratura e

padrão de fratura de pré-molares superiores, variando o tipo de preparo (Eakle, 1986; Mondelli et al., 1980; Soares et al., 2008a), técnica restauradora (Soares et al., 2004), tratamento endodôntico (Soares et al., 2008a). No entanto, poucas informações são relatadas sobre as características das amostras utilizadas nestes estudos, como por exemplo, o número e forma das raízes dos pré-molares.

Por outro lado, os ensaios mecânicos destrutivos apresentam limitações para obtenção de informações do comportamento estrutural interno do complexo dente-restauração durante a aplicação de carga, pois como consequência desta, são geradas tensões que resultam em deformações estruturais, podendo acentuar de acordo com a geometria e propriedades mecânicas, ultrapassando o regime elástico até atingir a ruptura da estrutura (Soares et al., 2008c). Neste caso, para análise da interferência de pequenos fatores no processo restaurador torna-se necessário a associação de ensaios destrutivos com metodologias não-destrutivas experimentais (Reeh et al., 1989) ou computacionais (Ausiello et al., 2001; Lin et al., 2001; Magne, 2007), favorecendo análise biomecânica seqüencial e detalhada do comportamento da amostra.

De acordo com Sakaguchi et al. (1991), a utilização de extensômetros aderidos na face externa da estrutura dental constitui método experimental não-destrutivo importante para mensuração dos diferentes tipos de deformações. Estudos anteriores empregaram extensômetros para análise da influência do tratamento endodôntico (Reeh et al., 1989), materiais restauradores (Secco et al., 2000; Soares et al., 2008c), e tipos de pinos intra-radulares (Santos-Filho et al., 2008).

O Método de Elementos Finitos (MEF) constitui análise numérica-computacional que vem sendo utilizado por diversas áreas desde a década de 50. Esta análise proporciona dados valiosos com custo operacional relativamente baixo e tempo reduzido, além de fornecer informações desconhecidas nos estudos experimentais. Na odontologia a potencialidade do MEF é comprovada com

análises bidimensionais (Lanza et al., 2005; Soares et al., 2008c) e pouco explorada pela análise tridimensional, a qual gera modelos com maior fidelidade e resultados mais confiáveis (Ichim et al., 2007). No entanto, a análise tridimensional é limitada, devido à necessidade de alta tecnologia para obtenção de imagens e geração de modelos, envolvendo a associação de vários tipos de softwares, o que dificulta a geração de modelos e obtenção dos resultados.

Diante deste contexto as hipóteses a serem testadas são: a quantidade de remoção de estrutura baseada no tipo de preparo cavitário e terapia endodôntica, assim como as diferenças morfológicas radiculares influenciam no comportamento biomecânico restaurador de pré-molares superiores.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Elementos Finitos

Wright & Yettram, em 1979, realizaram estudo para análise da distribuição de tensões em dentes pilares de próteses unitárias e parciais fixas. Modelo de elementos finitos foi utilizado para analisar a influência da propriedade mecânica do ligamento periodontal após aplicação de carga na direção vertical, oblíqua e horizontal variando a quantidade de osso alveolar e união dos dentes. A splintagem de dentes provocou maior dissipação das tensões, as quais também sofreram alteração de acordo com a quantidade de osso alveolar.

Em 1999, Toparli e colaboradores realizaram estudo biomecânico de pré-molar superior restaurado utilizando método de elementos finitos. O modelo foi restaurado com amálgama ou resina confeccionadas sobre ionômero de vidro e a distribuição de tensões foi investigada avaliando o resultado proveniente das forças mastigatórias e expansão dos materiais restauradores. Este estudo demonstrou o potencial da associação entre o método de elementos finitos com ensaios mecânicos laboratoriais utilizando para a geração e análise do modelo liguagem computacional FOURTRAN 77. Os autores demonstraram nesse estudo as vantagens que adesão do material restaurador à estrutura dental apresenta para reforço do dente.

Ausiello et al., em 2001, empregaram análise de elementos finitos tridimensional para simular a movimentação de cúspides em pré-molar superior restaurado com resina composta. Para os autores a combinação de diversos materiais e geometria complexa faz com que a análise de distribuição de tensões seja mais complexa. Foi criado um modelo de pré-molar superior humano tridimensional com preparo MOD e restauração com resina composta. Diferentes valores de rigidez foram atribuídos ao material restaurador: 1-dente hígido, 2-resina composta com módulo de elasticidade de 12,5 GPa, 3- resina composta com módulo de elasticidade de 25 GPa. Após aplicação de carga oclusal foi

observado que o módulo de elasticidade caracteriza-se como propriedade mecânica importante para o comportamento do complexo dente/restauração sendo que, quanto maior o módulo de elasticidade do material, menor a distribuição de tensões para a estrutura dental adjacente.

Joshi et al., em 2001, realizaram estudo que analisou a performance mecânica de dentes tratados endodonticamente por meio de elementos finitos tridimensional. Para isso os autores variaram o tipo de material restaurador e tipo de retentor intraradicular para dentes uniradiculares. Este estudo demonstrou que a forma e as propriedades mecânicas dos materiais restauradores influenciam diretamente no comportamento mecânico do complexo dente-restauração.

Lin et al., em 2001, relataram que o emprego de restaurações mésio-ocluso-distal (MOD) na restauração de extensa lesão cariosa depende de muitos fatores. É atualmente reconhecida que a resistência à fratura de uma restauração não é somente uma preocupação biológica, sendo que a forma da cavidade, dimensões e o estado de tensão devem ser levados em consideração. No estudo presente, um programa de auto-malhamento, recentemente desenvolvido foi usado para gerar 30 modelos tri-dimensionais (3D) de elementos finitos (MEF) que simulam a biomecânica para restauração em ouro tipo MOD em segundo pré-molar superior. Os resultados mostraram que em se aumentando o volume da cavidade MOD, resultou em aumento significativo das tensões em esmalte, mas não afetou as tensões em dentina. A profundidade foi o fator mais crítico que resultou em maior elevação de tensão em esmalte, enquanto à distância entre as paredes axiais foi o parâmetro mais importante em relação à dentina. Largura foi o fator que menos interferiu na concentração de tensões. Os achados deste trabalho questionam parcialmente o conceito tradicional de que a preservação de estrutura dental reduz o risco à fratura do dente, possibilitando a otimização da configuração do preparo cavitário para restauração MOD.

Lertchirakam et al., em 2003, relataram que fratura vertical em dentes posteriores tende a ocorrer na direção vestibulo-lingual, ou seja, onde a espessura de dentina é maior. Relataram também que fatores como forma do canal, morfologia externa da raiz e espessura de dentina influenciam na localização e direção da fratura radicular. Neste trabalho foi empregado estudo por elementos finitos simulando secções de raiz variando a espessura do canal radicular, forma, espessura externa e morfologia da raiz. Os resultados demonstraram que canais curvos são mais importantes que a morfologia interna padrão de distribuição de tensões. A redução de quantidade de dentina, ou seja, ampliando a luz do canal radicular, foi o fator mais importante na concentração de tensões no interior da estrutura dental.

Lanza et al., em 2005, compararam a distribuição de tensões em dentina e camada de cimento adesivo em dentes anteriores tratados endodonticamente, variando o tipo de material constituinte do retentor intraradicular. Foram gerados 3 modelos numéricos tridimensionais os quais receberam aplicação de força estática de 10N a 125°. Os dentes receberam retentores intraradiculares de aço, fibra de carbono e fibra de vidro. Os resultados foram analisados de acordo com as tensões de Von Mises. Quanto menor o módulo de elasticidade do material restaurador, maior a distribuição das tensões no interior da estrutura dental. A influência da capacidade elástica do cimento em distribuir as tensões foi pouco relevante quando foi empregado pino com alta rigidez.

Em estudo de 2006 Romeed e colaboradores compararam o comportamento biomecânico de um pré-molar superior restaurado com coroa total sobre condições similares de carregamento por meio de análise bi e tri-dimensional de elementos finitos. Os autores atribuíram as diferenças nos resultados de deslocamento e distribuição das tensões principais dos modelos 2D e 3D às diferenças das geometrias representadas nos modelos. Assim, pode-se concluir que a análise com modelos bi-dimensionais pode ser aplicada na investigação de aspectos-chave do comportamento de uma restauração em um

único elemento, mas que em certas situações a combinação de simulações bi e tri-dimensionais podem oferecer melhor entendimento do comportamento biomecânico de estruturas dentais complexas, pois, modelos sofisticados são necessários na compreensão de complexas unidades restauradoras.

Magne em estudo de 2007 descreveu metodologia para geração rápida de modelos de elementos finitos para estruturas dentais e restaurações. O autor digitalizou a imagem de um molar inferior intacto por meio de *scanner* de microtomografia computadorizada e os contornos de todas as estruturas foram adaptados seguindo a segmentação do dente. Posteriormente diferentes modelos foram exportados para programa de elementos finitos no qual foram testados e validados. Pode-se concluir que o método proposto foi capaz de gerar modelos de elementos finitos tri-dimensionais válidos, com diferentes cavidades e materiais restauradores.

Em 2007, Siso e colaboradores compararam a resistência de dentes restaurados com resina composta e dois sistemas de pino em pré-molares superiores uni-radiculares humanos. Os autores encontraram que o grupo hígido obteve os maiores resultados de resistência à fratura e o grupo que permaneceu sem restauração, mas com tratamento endodôntico e cavidade classe II teve os piores resultados. Os grupos que foram restaurados apenas com resina composta e adesivo de um passo tiveram menores resultados de resistência do que os grupos restaurados com adesivo de dois passos ou com adesivos auto-condicionantes associado a pinos radiculares. Pode-se concluir que pré-molares superiores tratados endodonticamente com cavidades MOD, restaurados com resina composta com ou sem pinos radiculares tiveram a resistência da cúspide vestibular aumentada. O adesivo de dois passos e condicionamento total aumentou significativamente a resistência à fratura comparado ao adesivo de um passo.

Ichim *et al.* desenvolveram um estudo em 2007 que investigou a influência do formato e profundidade de lesões bem como o direcionamento das cargas oclusais na resposta mecânica de restaurações cervicais de cimento de ionômero de vidro. Os autores geraram modelo de primeiro pré-molar inferior para análise por elementos finitos e lesões com formato de cunha ou arredondadas foram modeladas. Cada dente sofreu carregamento em diferentes ângulos e as tensões principais foram empregadas pelos autores como indicador de falha do material comparando com os valores de resistência máxima à tração do cimento de ionômero de vidro e com a resistência adesiva do material com o substrato dental disponível na literatura. Foi encontrado que dentes carregados oblíquamente exibiram significativamente maiores tensões na região cervical da restauração. Para forças inclinadas com angulação de 30° em relação com o eixo radicular, as tensões de tração na margem cervical da restauração excederam a resistência máxima à tração e resistência adesiva do material. Os autores puderam concluir que o diagnóstico oclusal e reajuste subsequente dos contatos dos dentes formam parte crítica no tratamento de lesões cervicais não cariosas.

Lin *et al.* em 2008 avaliaram a contribuição relativa das mudanças nos materiais restauradores, dimensões da cavidade, adaptação da camada adesiva e condições de carregamento na resposta biomecânica de uma restauração Classe II durante as mudanças de temperatura da cavidade oral. Os autores utilizaram modelo de elementos finitos para execução da análise térmica-estrutural. Os autores identificaram por meio da análise experimental que a expansão térmica do material restaurador amplificou o efeito térmico e dominou os valores de tensão no dente em altas temperaturas. Valores maiores de tensões foram observados com resina composta associada com forças laterais, cavidade profunda e cimento resinoso com alto módulo elástico. Além disso foi observado que cavidades profundas podem aumentar o risco de um dente restaurado à fratura, bem como *inlays* cerâmicas com baixa expansão térmica requerem devido ajuste oclusal para

redução das forças oclusais laterais além de um material cimentante com baixo modulo de elasticidade para obter um melhor distribuição de forças.

Extensometria

Reeh et al., em 1989, realizaram estudo que analisou a influência do tratamento endodôntico e procedimentos restauradores na rigidez d pré-molares superiores com preparos MOD. Para isso 42 pré-molares superiores humanos foram selecionados, os quais receberam 2 extensômetros colados nas cúspides vestibulares e palatinas para ensaios de extensometria. A carga oclusal compreensiva foi aplicada com esfera de 6,3 mm de diâmetro, com carga de 0 a 111N e velocidade de 37 N a cada 3 seg. Avaliaram o efeito do acesso endodôntico, instrumentação, obturação, preparo MOD e dente hígidos. O cálculo da rigidez relativa foi mensurado pela divisão da máxima deformação do dente hígido pela máxima deformação da condição testada. Foi demonstrado que o procedimento endodôntico reduz apenas 5% da rigidez original, enquanto que o preparo MOD reduz em 60% a rigidez de pré-molares superiores.

Sakaguchi et al., em 1991, realizaram um experimento com o método de elementos finitos para avaliar a formação e distribuição de tensões. Os autores analisaram que este método é um importante na realização de experimentos que pode contribuir para análise de falhas ocorridas clinicamente. Os autores utilizaram também a associação com método experimental que empregou a construção de modelo físico nos quais foram fixados extensômetros na face vestibular e lingual da coroa de dente extraído. Um modelo bi-dimensional de pré-molar foi reproduzido para realizar ensaios de elementos finitos que validariam os ensaios experimentais. Os resultados do método de elementos finitos mostraram correlação com os resultados experimentais.

Secco et al., em 2000, avaliaram o efeito de materiais restauradores a base de ionômeros de vidro convencional e modificado por resina e resina composta, bem como a influência da técnica restauradora na deformação de cúspides de pré-

molares superiores. Os autores utilizaram o método de extensometria e demonstraram que a remoção da estrutura dental para o preparo de cavidades tipo classe II e a presença de esmalte socavado aumentaram significativamente a deformação das cúspides em relação ao dente hígido.

Na segunda parte do estudo de 2008 de Soares *et al.* avaliaram a influência do tipo de preparo cavitário e materiais restauradores na deformação e distribuição de tensões em pré-molares superiores sobre condições de carregamento, correlacionando com os achados analisados na primeira parte do estudo. Os autores observaram que no ensaio de extensometria os grupos preparados e sem restauração e o grupo restaurado com amálgama apresentaram maiores valores de deformação que os grupos restaurados com resina composta, resina laboratorial e cerâmica reforçada com leucita. A análise por elementos finitos revelou que a remoção de estrutura dental e que o tipo de material restaurador alteraram o padrão de distribuição de tensões com os grupos não restaurados e os grupos restaurados com amálgama e resina laboratorial apresentando as maiores concentrações de tensões na estrutura dental. Concluiu-se que os espécimes restaurados com restaurações adesivas se comportam similar ao dente hígido, enquanto o comportamento de dentes restaurados com amálgama se assemelha mais ao de dentes não-restaurados.

Santos-Filho e colaboradores em estudo de 2008 avaliaram os efeitos de pinos intra-radiculares e de seu comprimento na deformação e resistência à fratura de raízes com tratamento endodôntico. Os autores verificaram que para todos os tipos de pinos a redução em seu comprimento resultou em aumento das deformações, entretanto, os pinos de fibra de vidro apresentaram menores aumentos na deformação radicular comparados aos núcleos metálicos fundidos ou pinos metálicos pré-fabricados. Nos grupos restaurados com pinos metálicos as fraturas tenderam a ocorrer na raiz e nos grupos restaurados com pinos de fibra de vidro essas fraturas ocorreram mais freqüentemente no núcleo de preenchimento. Os autores concluíram que o núcleo metálico fundido com 10,0

mm de comprimento apresentaram os maiores resultados de resistência à fratura e que o pino de fibra de vidro foi efetivo nos três comprimentos utilizados.

Resistência a fratura

Mondelli et al., em 1980, considerando que um dos principais fatores que causam falhas em procedimentos restauradores é a ocorrência de imperfeições na geometria do preparo cavitário que possam promover a fratura do dente, realizaram trabalho para avaliar a influência de diferentes configurações de preparos em dentes posteriores na resistência à fratura. Pré-molares receberam preparos classe I, classe II composta e classe complexa com três níveis de abertura vestibulo-lingual, com 1/4, 1/3 e 1/2 da distância intercuspidal de profundidade de 2,5 mm. Todos os preparos cavitários diminuíram a resistência dos dentes de forma inversamente proporcional ao aumento da largura da cavidade. Os autores concluíram que a remoção de estrutura dental promove redução significativa da resistência à fratura de dentes posteriores.

No ano de 1986, Eakle avaliou compósitos combinados com adesivo de esmalte ou adesivo de esmalte e dentina no aumento da resistência à fratura dos dentes com preparos MOD. Para este estudo selecionou 48 pré-molares com tamanhos semelhantes divididos em três grupos, sendo um para cada técnica restauradora e deixando o terceiro sem restauração, atuando como controle. Submeteu as amostras ao carregamento de compressão em máquina de ensaios universal através de esfera de 4,76 mm, com velocidade de 5 mm/min. Os dentes restaurados com resina composta, combinada ao adesivo para esmalte e dentina, apresentaram resistência estatisticamente superior aos demais grupos, e entre estes não houve diferenças significantes.

Rees et al., em 1994, utilizaram método experimental para cálculo do módulo de elasticidade da dentina. Os autores empregaram ensaios mecânicos de flexão de 3 pontos em barras de dentina humana. Os valores obtidos foram analisados e o valor médio do módulo de elasticidade para dentina foi 18,6 GPa.

Em 2006, Soares e colaboradores publicaram estudo que avaliou a influência do tipo de preparo cavitário na resistência à fratura de molares restaurados com restaurações de cerâmica reforçada por leucita. Os autores observaram que o grupo dos dentes hígidos apresentou os maiores resultados de resistência à fratura e que o fator extensão do istmo da cavidade não apresentou diferenças significantes. Porém, os diferentes tipos de preparo cavitário tiveram diferenças significantes entre si e as fraturas de todos os grupos tenderam a envolver a restauração. O recobrimento de cúspides não aumentou a resistência à fratura do complexo restaurador posterior com restauração de cerâmica reforçada por leucita. Neste trabalho foi empregado máquina padronizadora de preparo que foi desenvolvida pelos autores.

Sathorn *et al.* em 2005 avaliou a influência da extensão do canal radicular, raio de curvatura e concavidade na parede proximal da raiz no padrão e susceptibilidade à fratura. Uma secção transversal padronizada da região média da raiz de um incisivo inferior foi modelada pelos autores baseada nas medidas de 10 dentes e então a análise por elementos finitos foi realizada. O diâmetro, a forma do canal radicular e a concavidade da raiz sofreram variações e esses fatores foram analisados e relacionados com o padrão e resistência à fratura. Esses autores concluíram que todos os fatores interagem influenciando o padrão e a susceptibilidade à fratura e que a espessura dentinária não é o único fator determinante. A remoção de dentina nem sempre resulta em um aumento da susceptibilidade à fratura.

Soares et al., em 2005, analisaram a influência do método de inclusão e de reprodução do ligamento periodontal em testes de resistência à fratura, empregando incisivos bovinos. Oitenta dentes foram selecionados, 40 foram incluídos em resina acrílica e a outra metade em resina de poliestireno. Quatro métodos de simulação do ligamento periodontal foram executados: 1-Sem ligamento; 2 – Material de moldagem a base de poliéter, Impregum F; 3 – Material de moldagem a base de polissulfeto, Permelastic; 4 – Material de fixação de vidros

automotivos a base de borracha de poliuretano, sendo produzida dez amostras por grupo. Os corpos de prova foram armazenados por 24 horas em 100% de umidade e então foram submetidos a um carregamento na porção palatina, de forma oblíqua, reproduzindo o carregamento presente nos dentes superiores anteriores. Os padrões de fraturas foram classificados em relação a parâmetros pré-estabelecidos: a - fratura coronária; b - fratura na transição da coroa para o cilindro de resina; c - fratura com invasão parcial do espaço biológico; d - fratura radicular. Os resultados demonstram que o método de inclusão e o procedimento de reprodução do ligamento periodontal podem influenciar nos testes de resistência à fratura. O valor de resistência à fratura foi pouco influenciado pela presença do ligamento, porém o padrão de fratura foi altamente influenciado pela reprodução do ligamento periodontal. Os autores concluíram que a associação da inclusão com resina de poliestireno e a reprodução do ligamento com Impregum F parece ser o mais indicado para os testes de resistência à fratura.

Sagsen & Aslan avaliaram em 2006 a resistência à fratura de pré-molares superiores tratados endodonticamente restaurados com diferentes técnicas. Os autores incluíram os dentes em cilindros de resina acrílica e os espécimes sofreram carregamento oclusal vertical até sua fratura. Foi observado que o grupo restaurado com amálgama convencional teve a menor resistência à fratura quando comparado às restaurações adesivas. Porém, diferenças estatisticamente significantes não foram encontradas entre o grupo restaurado com amálgama adesivo e com os grupos restaurados com resina composta.

Shahrbafe e colaboradores avaliaram em estudo de 2007 o efeito da variação da espessura da crista marginal na resistência à fratura de pré-molares superiores tratados endodonticamente e restaurados com resina composta. Após ensaio de resistência à fratura e análise dos resultados os autores observaram que o grupo com dentes hígidos (G1) obteve os maiores resultados de resistência à fratura seguido pelos grupos com tratamento endodôntico e caixa OD com crista marginal remanescente de 2,0 mm (G3), 1,5 mm (G4), 1,0 mm (G5) e 0,5 mm (G6)

e por ultimo pelo grupo com tratamento endodôntico e preparo MOD (G2). Pode-se concluir que a preservação da crista marginal em dentes tratados endodonticamente restaurados com resina composta atua reforçando o elemento aumentando sua resistência à fratura.

Em 2008, Pilo e colaboradores avaliaram a preservação e a espessura da dentina residual em pré-molares superiores bifurcados após preparação conservadora do canal para pinos intra-radulares com brocas cilíndricas. Os autores observaram que a terapia endodôntica e o preparo para pino intra-radicular reduziu mais dentina nas faces correspondentes à bifurcação de ambas as raízes quando comparado com outras faces. O desgaste para os pinos prejudicou a raízes deixando uma quantidade de dentina menor que o mínimo recomendado de 1,0 mm em 61% (lingual) e 77% (vestibular) das raízes. Concluiu-se que a falta de espessura dentinária após o preparo para pinos intra-radulares implica na utilização limitada do uso desse pinos em primeiros pré-molares superiores e, quando esses forem necessário deve-se optar pela raiz lingual evitando a vestibular.

Soares *et al.* em estudo de 2008 avaliaram o efeito dos tratamentos endodôntico e restaurador na resistência à fratura de dentes pré-molares restaurados com resina composta por meio de ensaio laboratorial e análise por método de elementos finitos. Foi demonstrado pelos autores que a resistência do dente foi é completamente mantida quando preparos MOD são restaurados com resina composta e é parcialmente recuperada quando um preparo MOD associado com acesso endodôntico é restaurado da mesma maneira. Foi concluído nesse estudo que a restauração de resina composta tem papel fundamental na recuperação da resistência de dentes preparados e que o acesso endodôntico e a restauração aumentaram a incidência de envolvimento periodontal nas fraturas.

Em 2008, Soares e colaboradores disponibilizaram estudo dividido em duas partes avaliando a resistência à fratura, distribuição de tensões e

deformação de pré-molares superiores humanos restaurados com diferentes materiais. Foi demonstrado pelos autores que o grupo controle apresentou os maiores resultados de resistência à fratura e que os grupos restaurados apresentaram melhores resultados de resistência que os grupos não restaurados. Os grupos que foram restaurados com técnicas adesivas apresentaram melhores resultados que os que utilizaram técnicas restauradoras não-adesivas. Além disso, pode-se observar que os grupos que não foram restaurados ou foram restaurados com amálgama ou resina laboratorial apresentaram prevalência de fraturas catastróficas diferentemente dos grupos com dentes hígidos ou restaurados com cerâmica reforçada por leucita que apresentaram fraturas menos severas. No grupo restaurado com resina composta não se observou prevalência de nenhum dos tipos de fratura. Os autores concluíram que dentes com maior quantidade de tecido dental remanescente ou restaurados com técnicas adesivas apresentam melhores resultados de resistência à fratura.

Morfologia dental e incidência de fratura vertical

Joseph *et al.* em 1996 procuraram avaliar a significância clínica da anatomia da furca de primeiros pré-molares superiores através de análise biométrica realizada em dentes extraídos. Os autores encontraram que de 100 dentes avaliados 63 tinham raízes fundidas e 37 tinham raízes bifurcadas, desses, 38% tinham furca no terço médio da raiz, 35% no terço apical e 27% no terço cervical. Pode-se concluir que a variação anatômica em primeiros pré-molares é freqüente e que estudos biométricos da dentição humana podem auxiliar no melhor entendimento dos mínimos detalhes da morfologia.

Num estudo de 1998, Kartal e colaboradores investigaram a anatomia interna de pré-molares superiores por meio de microscopia de luz com espécimes corados por tinta. Esses espécimes foram avaliados quanto ao número de canais, tipo de canais, existência de canais laterais, sua localização e ramificação apical. Os autores concluíram que o sucesso na terapia endodôntica depende da

remoção do tecido pulpar e dos restos necróticos de dentro dos sistemas de canais e que o conhecimento da morfologia dos canais radiculares e suas variações potenciais podem ser de extrema importância para a terapia endodôntica.

Em estudo de 1999, Tamse *et al.* avaliaram dentes tratados endodônticamente com fraturas verticais. Noventa e dois elementos nessas condições foram examinados clinicamente e radiograficamente, antes e depois da extração. Os autores observaram que os segundos pré-molares superiores e as raízes mesiais dos molares inferiores foram as regiões mais acometidas pelo tipo de fratura em estudo. Além disso em 67,4% desses dentes uma bolsa periodontal isolada estava presente e em 34,8% uma fistula aparecia mais frequentemente próxima à margem gengival do que na área apical. Foi concluído que achados como radiolucência lateral, bolsa isolada e fistula localizada próxima à região coronal podem auxiliar os clínicos a obterem diagnósticos corretos na maioria dos casos.

Tamse *et al.* realizaram em 2000 estudo morfométrico que avaliou o sulco na raiz vestibular de primeiros pré-molares superiores. Os autores demonstraram que esse sulco esteve presente em 97% de suas amostras e assim, as raízes vestibulares foram seccionadas em fatias de 1,0 mm para realização das medições morfométricas. Foi encontrado que a invaginação mais profunda do sulco estava a uma distância média de 1,18 mm da bifurcação e que a distância média foi de 0,4 mm. Já a distância média da invaginação mais profunda para as paredes do canal foi de 0,81 mm. Assim, os autores concluíram que a utilização de instrumentos rotatórios para alargamento desses canais com invaginações pode ser muito perigosa e que pinos com formato cilíndrico são contra-indicados nessa região.

Cohen *et al.* propuseram, num estudo de 2003, técnicas que auxiliassem o dentista na localização e reconhecimento de fraturas verticais da raiz. Os autores

examinaram 36 pacientes com esse tipo de fratura diagnosticando as mesmas por meio de histórico dental e avaliações clínicas e radiográficas. O estudo revelou que 34 dos 36 dentes fraturados eram não-vitais, o que pode ter sido proveniente de procedimentos excessivos executados na terapia endodôntica. 31 dos dentes tratados endodonticamente fraturaram como resultado de pinos mal preparados ou seleção inapropriada para serem pilares de fixação de próteses. As duas fraturas em dentes vitais ocorreram em pacientes com histórico de bruxismo. Os autores concluíram que fraturas verticais da raiz podem ser detectadas com maior facilidade escutando as principais reclamações dos pacientes, examinando cuidadosamente radiografias periapicais e interproximais e executando um acurado exame clínico.

Em 2005 Deutsch *et al.* apresentaram estudo que objetivou avaliar as características-chave na morfologia da câmara pulpar de dentes superiores bifurcados e bicuspídeos. Os autores radiografaram cada pré-molar utilizando sistema digital e as medições foram feitas no programa que acompanha o sistema. Assim os mesmos observaram que a menor distância entre o fundo da câmara pulpar até a furca em pré-molar bi-radicular foi de 0,6 mm e que a maior foi de 5,5 mm. A média dessa medida verificada nos espécimes foi de 1,85 mm.

Em estudo de 2006, Cohen *et al.* avaliaram dentes com fraturas verticais completas ou incompletas estendendo através do esmalte, dentina e polpa no longo eixo do dente. Diferentes variáveis foram investigadas e a sua correlação avaliada estatisticamente com a presença de fraturas radiculares verticais. Especificamente os autores avaliaram gênero, localização do dente, idade, achados clínicos e radiográficos, bruxismo e condição pulpar. Os autores coletaram os dados de três diferentes endodontistas, de três regiões geográficas distintas, compreendendo um total de 277 dentes. Embora as fraturas verticais de raiz possam ocorrer em conjunção com qualquer dos parâmetros investigados, somente certos fatores foram demonstrados pelo estudo como mais ocorrentes em número significativo de casos. Concluiu-se que as fraturas verticais de raiz são

estatisticamente mais prevalentes em molares inferiores e pré-molares superiores. Geralmente as fraturas nesses dentes estão associadas com perda óssea, dor à percussão, restaurações extensas e parecem ocorrer mais em pacientes do sexo feminino idosos. Além disso, os autores observaram que as fraturas verticais de raiz não estão necessariamente relacionadas com perda óssea periapical, alargamento do ligamento periodontal, características pulpares particulares ou bruxismo.

Katz *et al.* investigaram em estudo de 2006 a espessura de dentina residual de pré-molares superiores bifurcados após terapia endodôntica e preparação do canal radicular para colocação de pino intra-canal. A espessura dentinária foi avaliada após cada procedimento em oito aspectos da raiz além de três níveis de profundidade. Os autores demonstraram que a diferença na espessura da dentina residual foi altamente significativa de acordo com o procedimento, profundidade do corte e localização da face analisada e enfatizaram a importância da espessura dentinária mínima da raiz vestibular, especialmente próximo à bifurcação, contra-indicando a utilização de retentores intra-radiculares nessa raiz.

3 PROPOSIÇÃO

A proposta deste estudo foi avaliar o comportamento biomecânico (distribuição de tensões, deformação e fratura) de pré-molares superiores humanos de diferentes morfologias radiculares, variando a quantidade de remoção de estrutura de acordo com o tipo de preparo. Para isso, este trabalho associou simulações computacionais, e métodos experimentais destrutivos e não-destrutivos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os dentes utilizados deste estudo foram extraídos na Clínica de Cirurgia e Traumatologia Buco-Maxilo-Facial da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia com indicação ortodôntica e prévio consentimento dos pacientes, por meio de aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa da mesma instituição (217/06, Anexo 1). Os dentes hígidos, livres de trinca, desgaste e cárie, foram armazenados em solução de água destilada e timol a 37°C. Este estudo foi dividido em 3 fases distintas e correlacionadas:

1º) Simulação computacional associando 4 morfologias radiculares e 7 tipos de preparo (Tabela 1), totalizando 28 modelos para o método elementos finitos.

2º) Análise experimental não-destrutiva (extensometria) da deformação de cúspides de 40 pré-molares padronizados. Estes dentes foram divididos em 4 grupos (n=10) de acordo com as 4 morfologias radiculares. Todas as amostras de cada grupo receberam 7 tipos de preparos seqüenciais (Tabela 1).

3º) Posteriormente, foi realizado teste de resistência a fratura e análise do padrão de fratura. Para este teste as amostras estavam restauradas com o último preparo (RC), descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição dos modelos computacionais e grupos experimentais.

Nome do modelo/grupo		Descrição
Morfologia radicular	Uni	Dentes unirradiculares
	FA	Dentes birradiculares com furca no terço apical
	FM	Dentes birradiculares com furca no terço médio
	FC	Dentes birradiculares com furca no terço cervical
Tipo de preparo	H	Dentes hígidos
	O	Dentes com preparo oclusal
	OD	Dentes com preparo ocluso-distal
	MOD	Dentes com preparo mesio-ocluso-distal
	MOD+A	Dentes com preparo mesio-ocluso-distal e acesso endodôntico
	TE	Dentes tratados endodonticamente
	RC	Dentes restaurados com resina composta

4.1 Elementos Finitos

Foi selecionado pré-molar superior hígido que serviu como modelo padrão da porção coronária (Figura 1). Posteriormente, o dente foi posicionado em Scanner de contato (MDX-40, Roland, Centro de Pesquisas Renato Archer, SP, Brasil). Este aparelho gerou todos os contornos externos do dente, calibrado em 0,2mm para cada traçado (Figura 1). A geometria foi externa foi arquivada em arquivos do tipo *.STL (Stereolitográficos). Na sequência, a raiz foi protegida com cera utilidade e o esmalte foi mergulhado em solução de ácido clorídrico 10% edegradado durante 10 min. O esmalte foi totalmente removido. A remoção do esmalte foi confirmada por meio de análise visual em lupa estereoscópica 40X (Leica, Hanau, Alemanha) e a dentina coronária e radicular foi preservada. Novamente o scaneamento da geometria externa foi realizado.

Os arquivos *.STL do esmalte e dentina foram exportados para software de bio-CAD (Computer Assisted Desing; Rhino3D, Rhinoceros, USA) para geração de modelo tridimensional que serviu de padrão coronário para posterior geração de diferentes morfologias radiculares (Figura 2). Neste programa foram geradas superfícies NURBS (Non Uniform Rational Basis Spline), próprias para modelagem de geometria complexa e bio-modelagens (Figura 2), baseadas na geometria externa obtida. A partir destas superfícies foram gerados os volumes das estruturas internas e externas de cada dente scaneado. As diferentes formas de tratamento e as diferentes morfologias radiculares foram geradas neste software (Figura 3). O dente foi seccionado e o modelo da câmara pulpar gerado de acordo com o contorno externo da câmara pulpar, enquanto que o conduto radicular foi desenhado a partir da observação radiográfica das amostras.

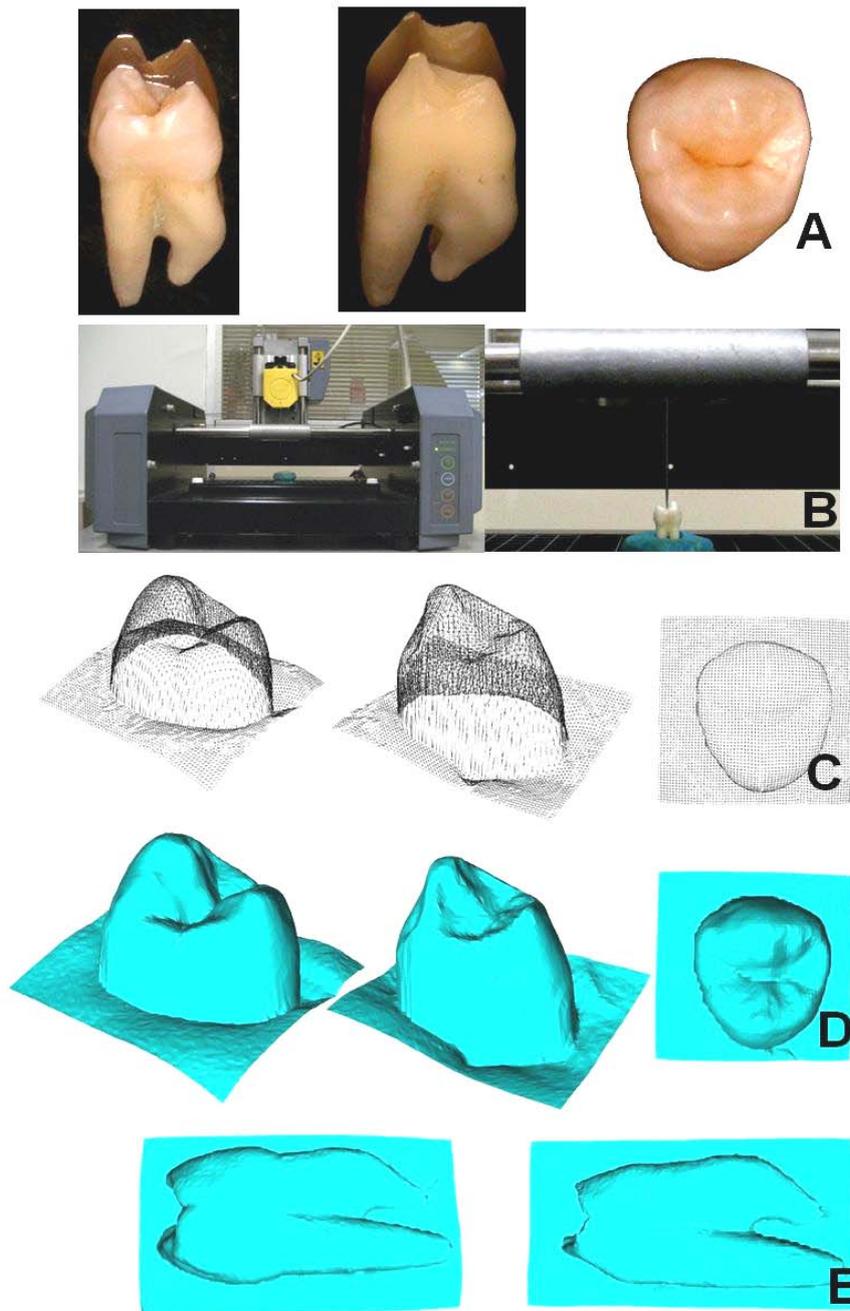


Figura 1 – Obtenção da geometria do modelo. (A) Dente padrão (esmalte, dentina e coroa); (B) Scanner de contato, mapeando a superfície oclusal; (C) Nuvem de pontos – arquivo *.STL; (D) Otimização do arquivo *.STL para observação de detalhes oclusais; (E) Detalhes da face proximal de esmalte e dentina.

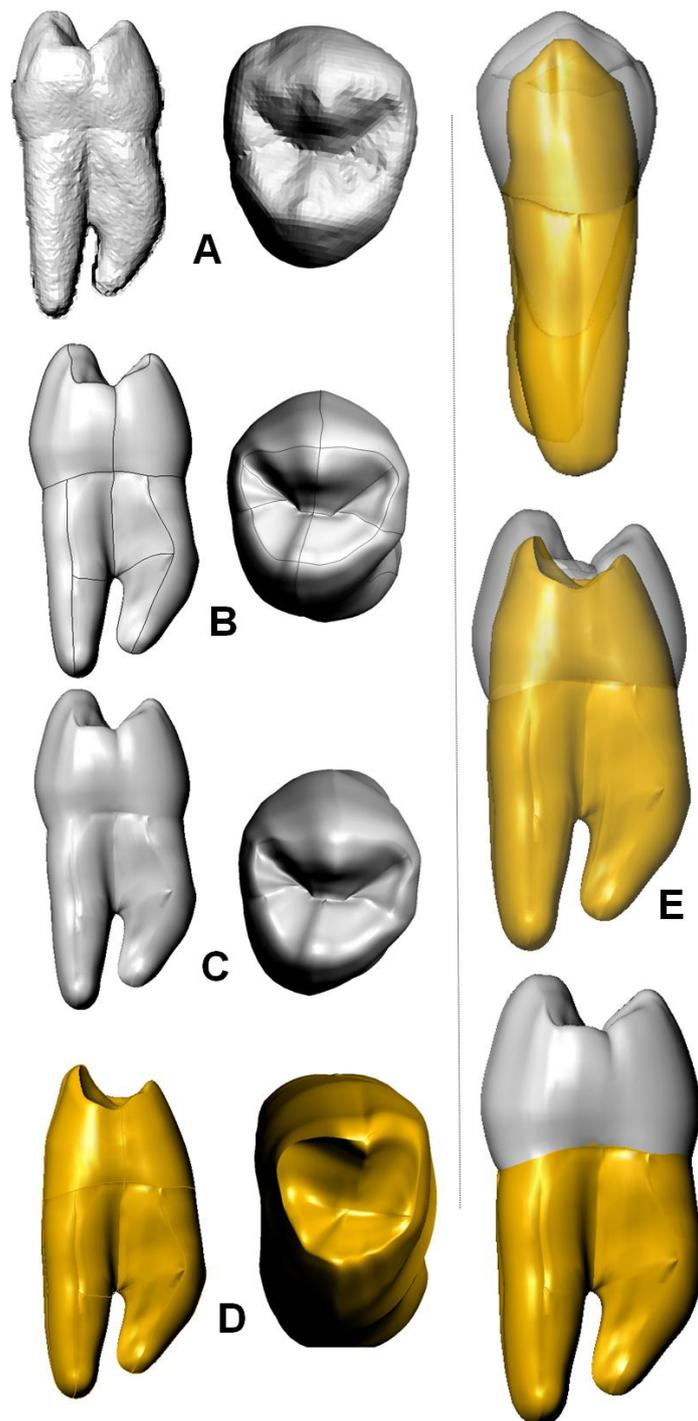


Figura 2 – Modelo gerado pelo CAD. (A) Textura do scaneamento; (B) Superfícies NURBS; (C) Modelo renderizado do esmalte; (D) Geometria renderizada da dentina; (E) Modelo padrão montado (vista vestibular e proximal).

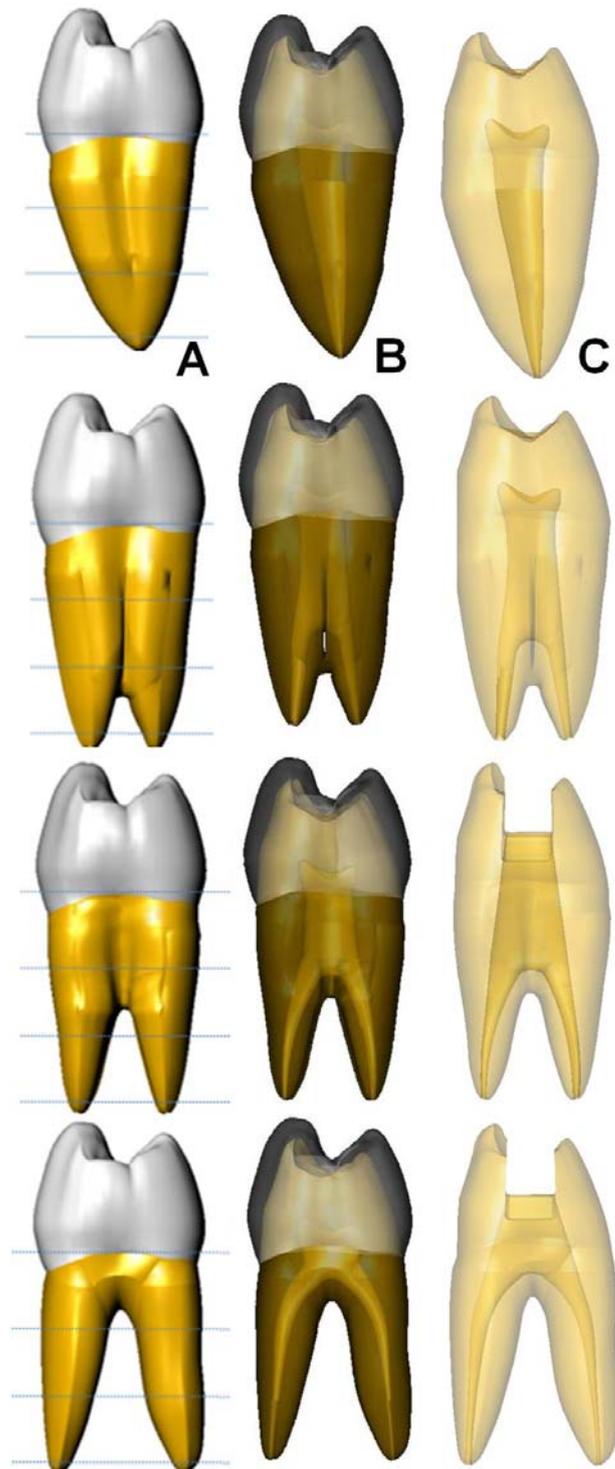


Figura 3 – Morfologias radiculares e anatomia do conduto radicular. (Coluna A) Dente unirradicular e localização da furca no terço radicular; (Coluna B) Relação do conduto radicular com outras estruturas; (C) Contorno do canal radicular.

A simulação do ligamento periodontal e inclusão seguiram os padrões utilizados nos experimentos laboratoriais (Figura 4), que será detalhada no item 4.2 deste estudo.

A partir da associação de 7 tipos de redução seqüencial de estrutura com 4 tipos de morfologias radiculares foram obtidos 28 modelos. Esta associação está descrita na Tabela 1 e corresponde também aos grupos testados no ensaio de extensometria (Figura 5). A Figura 6 detalha as dimensões e características dos preparos, as quais foram utilizadas nos testes laboratoriais.

Os modelos geométricos gerados no CAD foram exportados para o software de pré-processamento (FEMAP, NoranEngineering, USA) e a malha de cada estrutura foi gerada empregando elemento sólido do tipo quadrático (Figura 7). O processo de malhagem foi controlado empregando-se ferramentas específicas do software de pré-processamento, o que promoveu homogeneidade e conectividade da malha. A quantidade de elementos e nós de cada modelo estão descritos na Tabela 2. Posteriormente, as propriedades mecânicas necessárias para desenvolvimento de estruturas isotrópicas, lineares e homogêneas foram inseridas. Estas propriedades foram obtidas por meio de revisão da literatura (Tabela 3). Os modelos foram exportados para o módulo de processamento do software (NeiNastran, NoranEngineering, USA) para definição das condições de contorno, etapa importante na simulação dos contatos entre estruturas, restrição do modelo, aplicação de carga e análise das tensões (Figura 7). Foi aplicada pressão constante de 50N em cada cúspide com direção normal à superfície das vertentes, em pontos previamente demarcados e padronizados no CAD, empregando esfera de 8,0mm de diâmetro para localização da região a ser carregada. A restrição do modelo foi realizada na base e superfície lateral do cilindro. Para análise dos resultados foi empregado critério de associação de tensões máximas principais de von Mises (Figura 7).

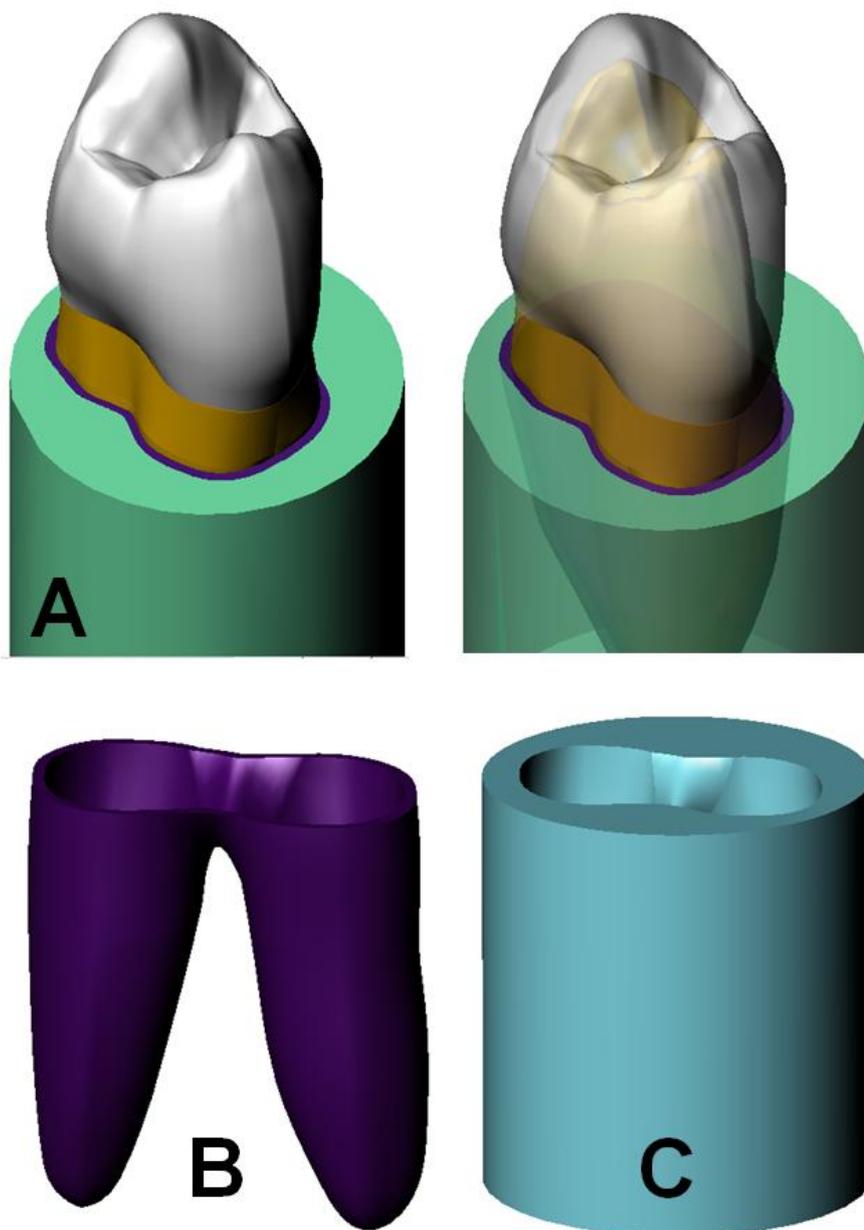


Figura 4 – Simulação do ligamento periodontal. (A) Conjunto dente, ligamento e cilindro; (B) Geometria e espessura do ligamento (0,3mm de espessura); (C) Geometria do cilindro.

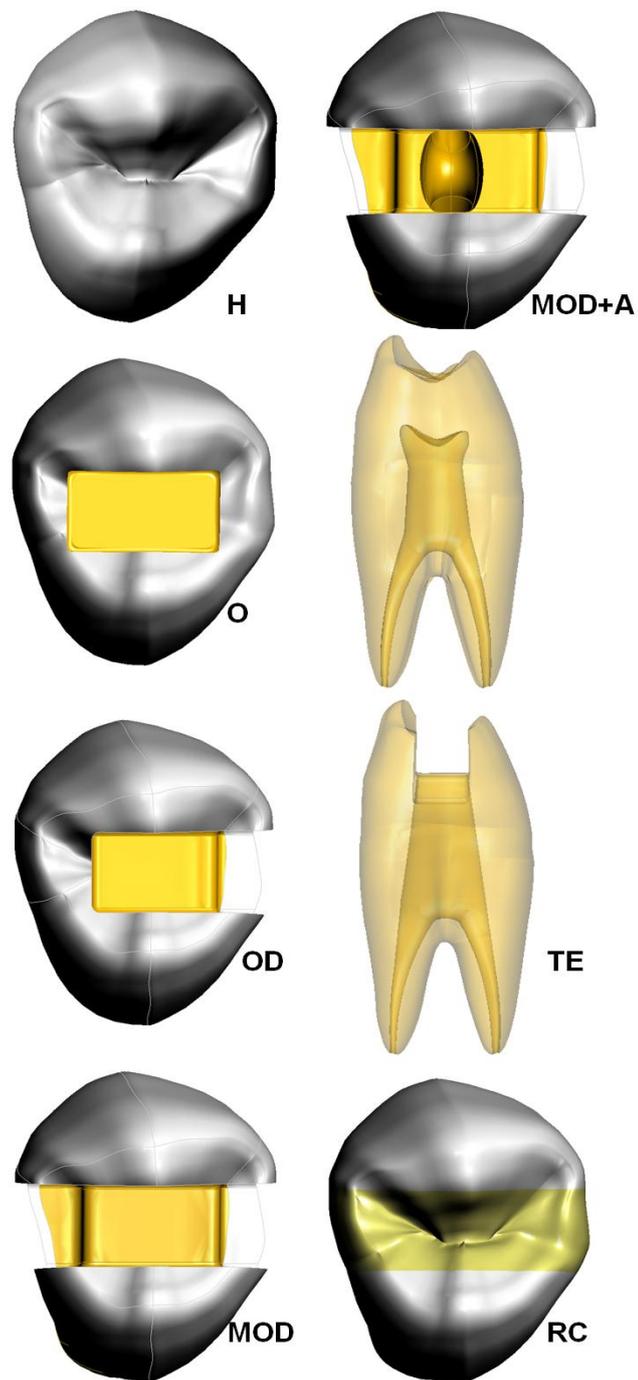


Figura 5 – Geometria dos preparos caracterizando a redução seqüencial de estrutura. Em TE observa-se a diferença do conduto não tratado (acima) com o conduto tratado endodonticamente (abaixo)

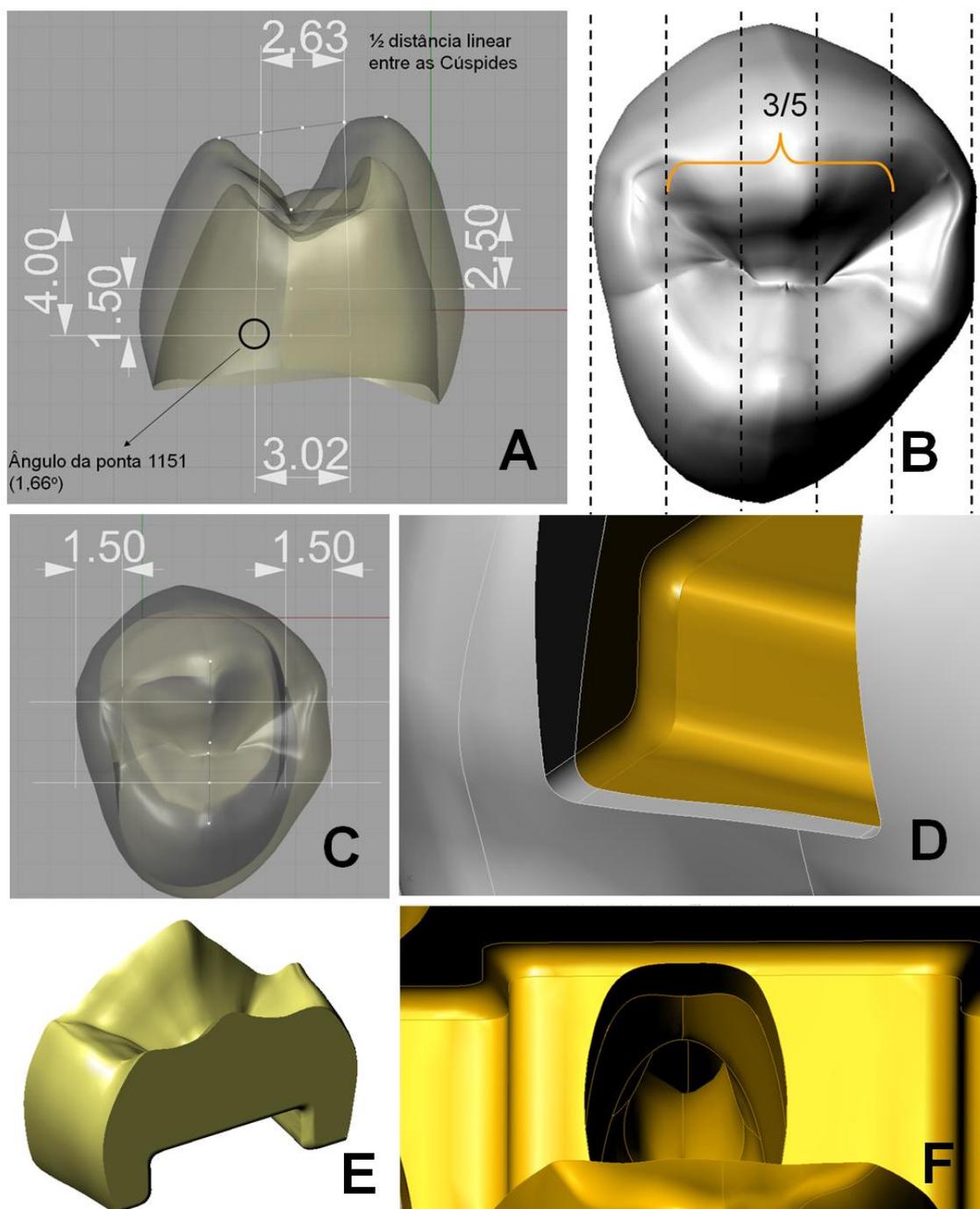


Figura 6 – Características dos preparos. (A) Dimensões dos preparos em milímetros; (B) Largura do preparo oclusal; (C) Espessura das cristas marginais em milímetros; (D) Arredondamento dos ângulos internos (raio de curvatura de 0,75mm); (E) Contorno da restauração; (F) Relação do acesso endodôntico com as paredes e ângulos do preparo.

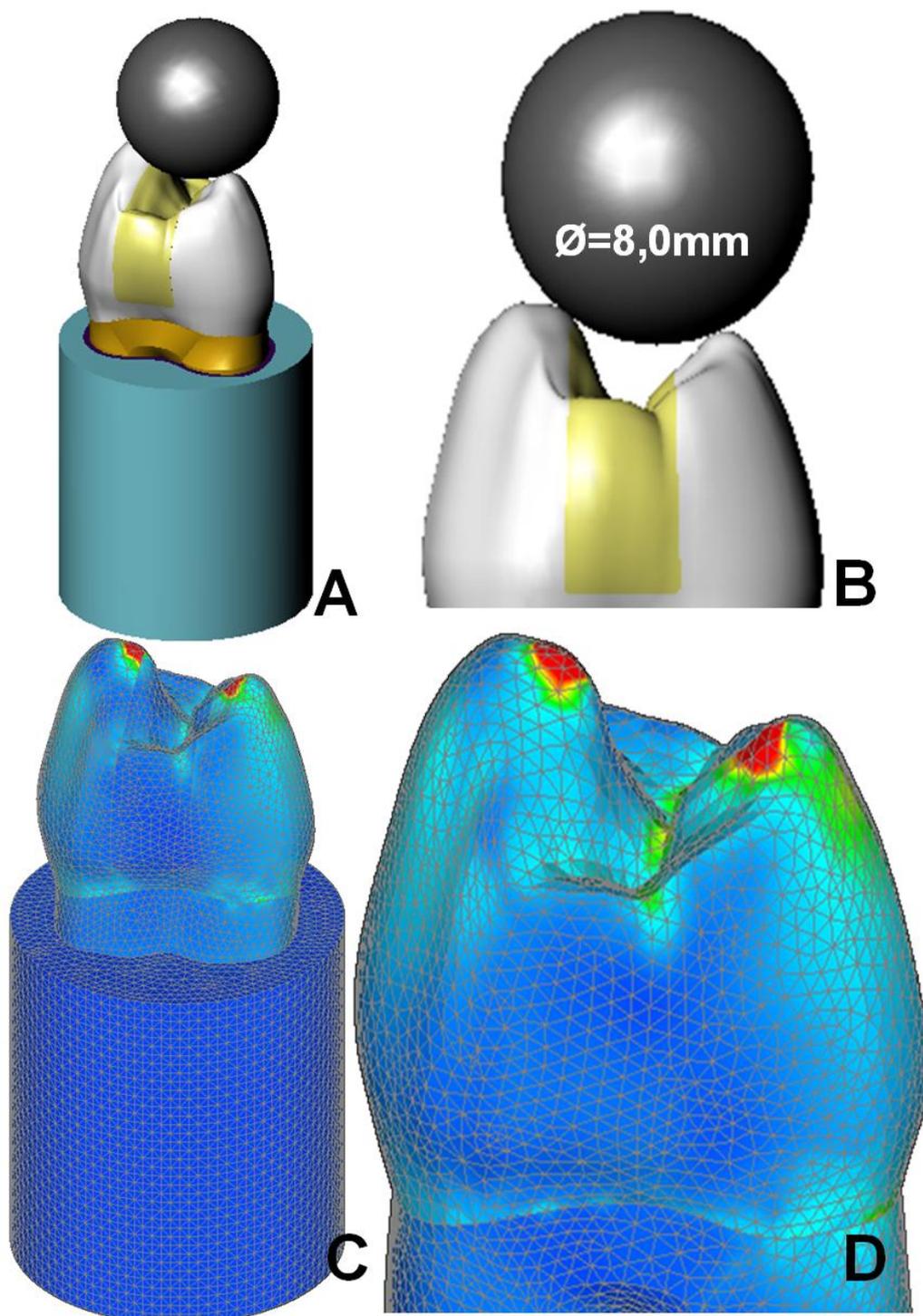


Figura 7 – Simulação do contato esfera dente (A); relação da esfera com as cúspides (B); característica da malha do modelo (C); observa-se homogeneidade, controle e conectividade da malha (D).

Tabela 2 - Número de elementos e nós dos modelos.

Modelos	Elementos	Nós
Uni-H	160987	254939
Uni-O	161551	256468
Uni-OD	158763	251879
Uni-MOD	157284	250905
Uni-MOD+A	155961	248001
Uni-TE	152852	243552
Uni-RC	161201	257842
FA-H	155279	249575
FA-O	154570	249225
FA-OD	154623	248970
FA-MOD	157912	255960
FA-MOD+A	155481	249941
FA-TE	147867	239257
FA-RC	157243	255464
FM-H	167390	268138
FM-O	175260	281323
FM-OD	162975	262002
FM-MOD	163504	263226
FM-MOD+A	162274	261357
FM-TE	160283	258754
FM-RC	169986	275439
FC-H	176697	283051
FC-O	168463	271278
FC-OD	175008	281101
FC-MOD	172649	277829
FC-MOD+A	170040	273918
FC-TE	170103	274036
FC-RC	180112	291289

Tabela 3 - Propriedades mecânicas das estruturas dentais e materiais odontológicos empregados.

Estrutura	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Referência
Esmalte	46,8	0,30	Wright & Yetram, 1979
Dentina	18,0	0,31	Rees et al., 1994
Poliéster	0,05	0,45	Soares et al. 2008
Resina de Poliestireno	13,5	0,31	Soares et al. 2008
Resina composta	16,6	0,24	Joshi et al., 2001
Ionômero de vidro	10,8	0,30	Ichim et al., 2007

4.2 Extensometria

Dos 142 dentes coletados foram selecionados 40 pré-molares superiores (PMS) humanos hígidos com dimensões coronárias semelhantes e diferentes morfologias radiculares. As dimensões dos dentes foram determinadas pela mensuração do volumes representativos da porção coronária e radicular obtida com paquímetro digital (Mitutoyo, Tokyo, Japan) nas direções méso-distal (MD) e vestibulo-palatino (VP) (Apêndice 1).

Foram selecionados dentes que apresentavam dimensões da coroa e raiz com variação máxima de 10% em relação ao valor médio. Os dentes foram divididos em 4 grupos (n=10) descritos abaixo, de acordo as diferentes morfologias radiculares encontrados na literatura (Joseph et al., 1996; Kartal et al., 1998): Uni – pré-molares uniradiculares; FA – biradiculares com furca presente no terço apical da raiz; FM – biradiculares com furca presente no terço médio da raiz; FC – biradiculares com furca presente no terço cervical da raiz. Para os grupos com dentes biradiculares, foram selecionados dentes com raízes totalmente divergentes e furca evidente. Os dentes foram posicionados em lupa estereoscópica (Leica, Hanau, Alemanha) com aumento de 10X para localização

do ápice da furca e divisão da porção radicular em 3 terços, para posterior classificação do dente de acordo com a localização da furca.

Para mensuração da deformação das cúspides foram fixados paralelamente ao longo eixo dos dentes dois extensômetros (PA-06-060BG-350L, Excel Sensores, SP, Brasil), um na base cúspide vestibular e outro na base da cúspide palatina de cada amostra, com a grelha (porção ativa do extensômetro) posicionada logo abaixo da junção amelo-cementária. Os extensômetros foram posicionados paralelamente ao longo eixo do dente, na região imediatamente abaixo do limite amelo-cementário. Um terceiro extensômetro foi fixado perpendicularmente ao longo eixo do dente, na face distal de todas as amostras, 1,0mm abaixo do limite amelo-cementário. Estes mensuradores de deformação apresentam resistência elétrica de 350Ω e fios de cobre soldados nos terminais (Figura 8). O fator de sensibilidade (gauge factor) é de 2,12. A fixação dos extensômetros foi realizada com aplicação de ácido fosfórico a 37% durante 15s, lavagem com água durante 15s e secagem com jatos de ar nas faces onde foram colados os extensômetros. Estes foram aderidos à estrutura dental com adesivo de cianoacrilato (Super Bonder, Loctite, Brasil) sob pressão digital durante 60 segundos (Figura 8).

Os dentes foram armazenados em água destilada a 37°C . Posteriormente o ligamento periodontal foi simulado (Soares et al., 2005). A porção radicular foi recoberta por película de cera com espessura aproximada de 0,3mm e 2,0mm abaixo do limite amelo-cervical. O dente foi posicionado dentro de cilindro de PVC para verter resina de poliestireno. Material de moldagem a base de poliéter (Impregum F, 3M Espe, St.Paul, USA) foi manipulado de acordo com as normas do fabricante para substituir o espaço ocupado pela cera na porção radicular. A Figura 9 ilustra a relação da fina camada de poliéter com as paredes da raiz e superfícies internas do cilindro de resina.

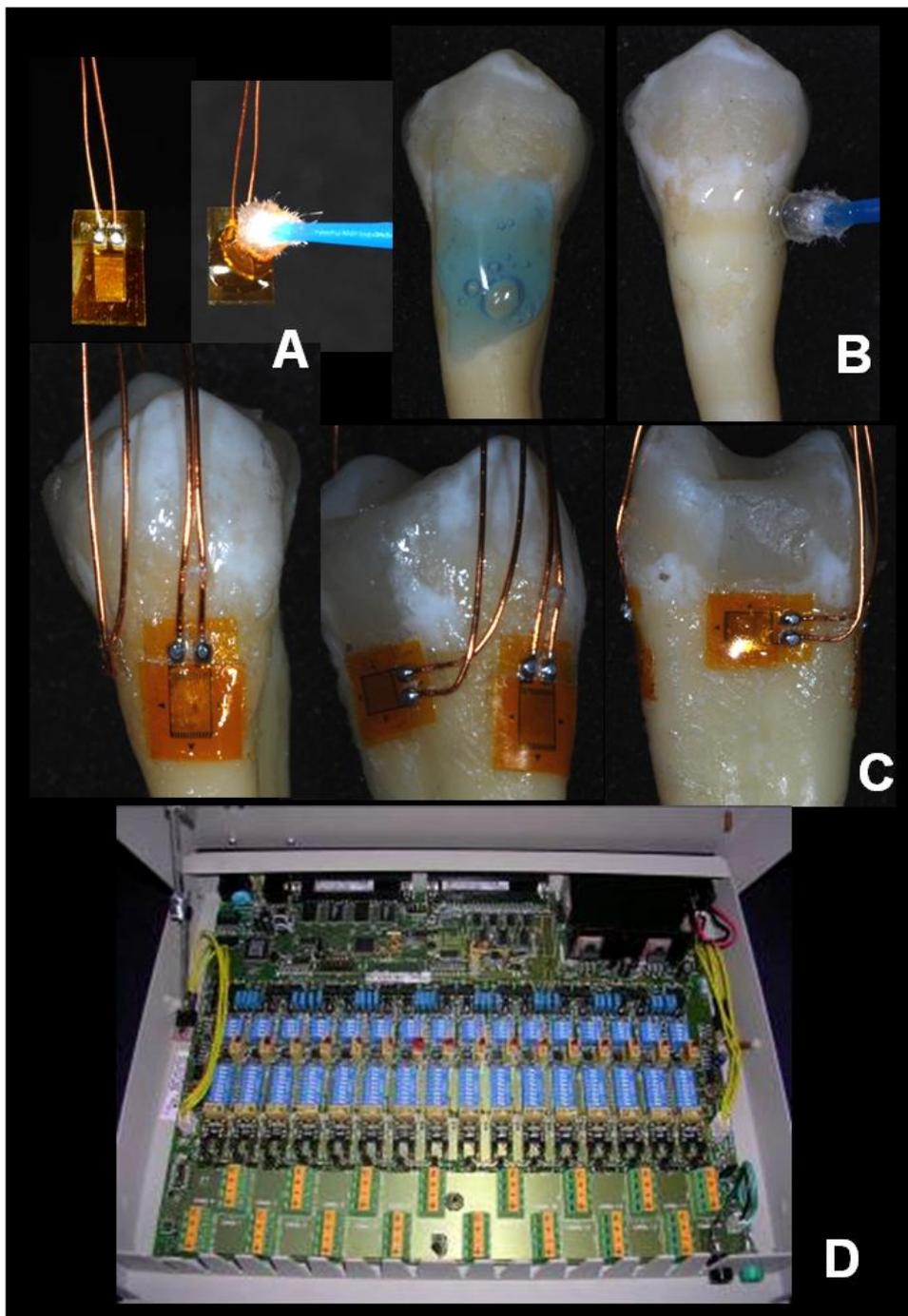


Figura 8 – Conexão dos extensômetros. (A) Aplicação de cianoacrilato na base do extensômetro; (B) Tratamento da superfície dental com ácido e aplicação de cianoacrilato; (C) Posição dos extensômetros; (D) Sistema de aquisição de sinais de deformação que recebeu conexão de meia ponte como descrito por Soares et al., 2008b.

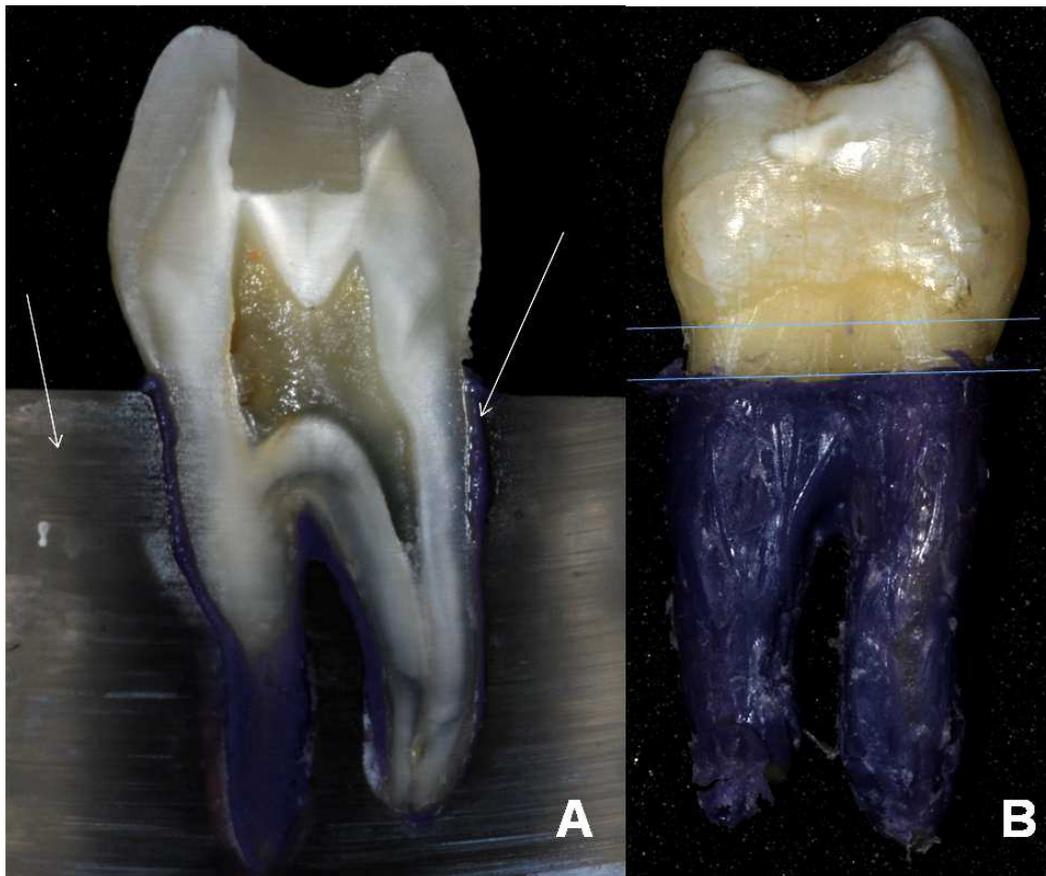


Figura 9 – Simulação do ligamento periodontal e inclusão. (A) Espessura da camada de poliéter e do cilindro de resina de polistireno; (B) Posição do ligamento periodontal.

A partir desta etapa a deformação das cúspides e da face proximal de cada uma das 7 fases de redução sequencial da estrutura dental foram mensuradas na mesma amostra: H- pré-molar hígido; O- preparo oclusal, OD- preparo ocluso-distal; MOD- preparo mesio-ocluso-distal; MOD+A- acesso endodôntico; TE- tratamento endodôntico, e RC- restauração com resina composta. Os preparos foram realizados com máquina padronizadora de preparos (Soares et al., 2004), utilizando ponta diamantada #1151 (KG Sorensen, Barueri, SP, Brasil) (Figura 10). O preparo da caixa oclusal envolveu 1/2 istmo, 2,5mm de profundidade e 3/5 da largura mesio-distal. A caixa proximal apresentou 4,0mm de profundidade, com parede axial de 1,5mm altura e parede gengival com 1,5mm de largura (Figura

11). As características dos preparos e acesso endodôntico seguiram os padrões utilizados nos modelos de elementos finitos (Figura 6).

Após a realização dos preparos, foi realizado acesso endodôntico com ponta diamantada cilíndrica de 1,4mm de diâmetro (# 1014, KG Sorensen, Barueri, SP, Brasil) (Figura 11). Os canais radiculares foram instrumentados até o forame apical com limas tipo Kerr (Malleiffer, Ballaigues, Switzerland) na seqüência de numeração de 15 a 40. Solução de hipoclorito de Sódio 2,5% foi utilizada para irrigação e limpeza do canal radicular. Após instrumentação, todos os dentes preparados foram obturados com guta-percha (Maillefer, Ballaigues, Switzerland) e cimento endodôntico (Sealer 26, Dentisply, New York, USA) por meio da técnica de condensação lateral. A embocadura do canal radicular foi selada com cimento de ionômero de vidro (Vidrion F, SSWhite, USA) (Figura 12). Para confecção das restaurações em resina composta o preparo foi condicionado com ácido fosfórico 37% (Dentisply, New York, USA) durante 15 segundos, lavados por 15 segundos com spray ar-água e secos com papel absorvente. Duas camadas de sistema adesivo convencional simplificado (Adper Single Bond 2, 3M/Espe, St Paul, USA) foram aplicadas com intervalo de 20 segundos e fotoativada por 20 segundos (Figura 12). A resina composta nano-particulada na cor A2 (Filtek Supreme, 3M-Espe, St Paul, USA) foi inserida em 8 incrementos empregando-se matriz metálica, sendo fotoativados por 20 segundos cada (XL 3000, 3M/Espe, St Paul, USA – 700mW/cm²) (Figura 12).

Os fios dos extensômetros foram conectados ao Sistema de Aquisição de dados (ADS0500IP, Lynx, SP, Brasil – Laboratório Integrado de Pesquisa Odontológica - FOUFU) no esquema de meia ponte com três extensômetros fixados em outro dente fora do processo de análise para compensar alterações dimensionais por temperatura (Soares et al., 2008c), para mensuração das deformações em cada uma das 7 fases de redução seqüencial de estrutura. Assim, após o término de cada preparo as amostras foram submetidas à aplicação de carga axial de compressão, com velocidade de 0,5mm/minuto, aplicada com

esfera de 8,0mm diâmetro contatando a cúspide vestibular e palatina, até o limite máximo de 100N em máquina de ensaio mecânico (EMIC DL 2000, São José dos Pinhais, Brasil) (Figura 13). Os dados foram transferidos para computador que utilizou software específico de aquisição, transformações de sinais e análise dos dados (AqDados 7.02 e AqAnalisys, Lynx, SP, Brasil). Durante a aplicação da carga o aquisitor de dados coletou 1 nível de microdeformação (μs) a cada 0,3 segundos utilizando carga contínua de 0 a 100N. Os resultados foram obtidos em microdeformação separadamente para cúspide palatina, vestibular e região proximal. A média de cada grupo foi gerada para análise, empregando-se análise de variância (fatorial 7x4) e teste de comparação de médias de Tukey HSD ($\alpha=0,05$) para os valores obtidos com a associação das cúspides vestibular e palatina, e separadamente para os dados obtidos na face proximal.

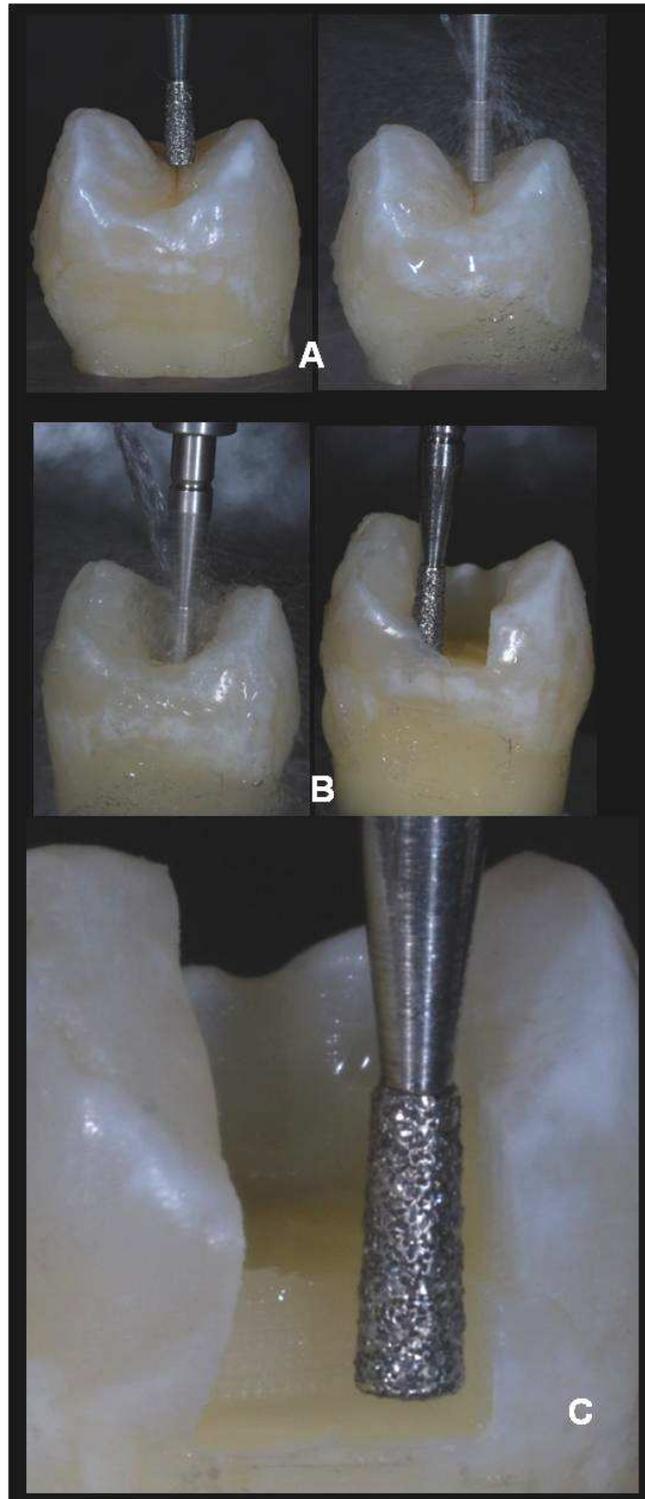


Figura 10 – Ilustração dos preparos das amostras. (A) Posição da ponta diamantada; (B) Confecção da caixa oclusal e remoção da crista; (C) Confecção da caixa proximal e características do preparo.

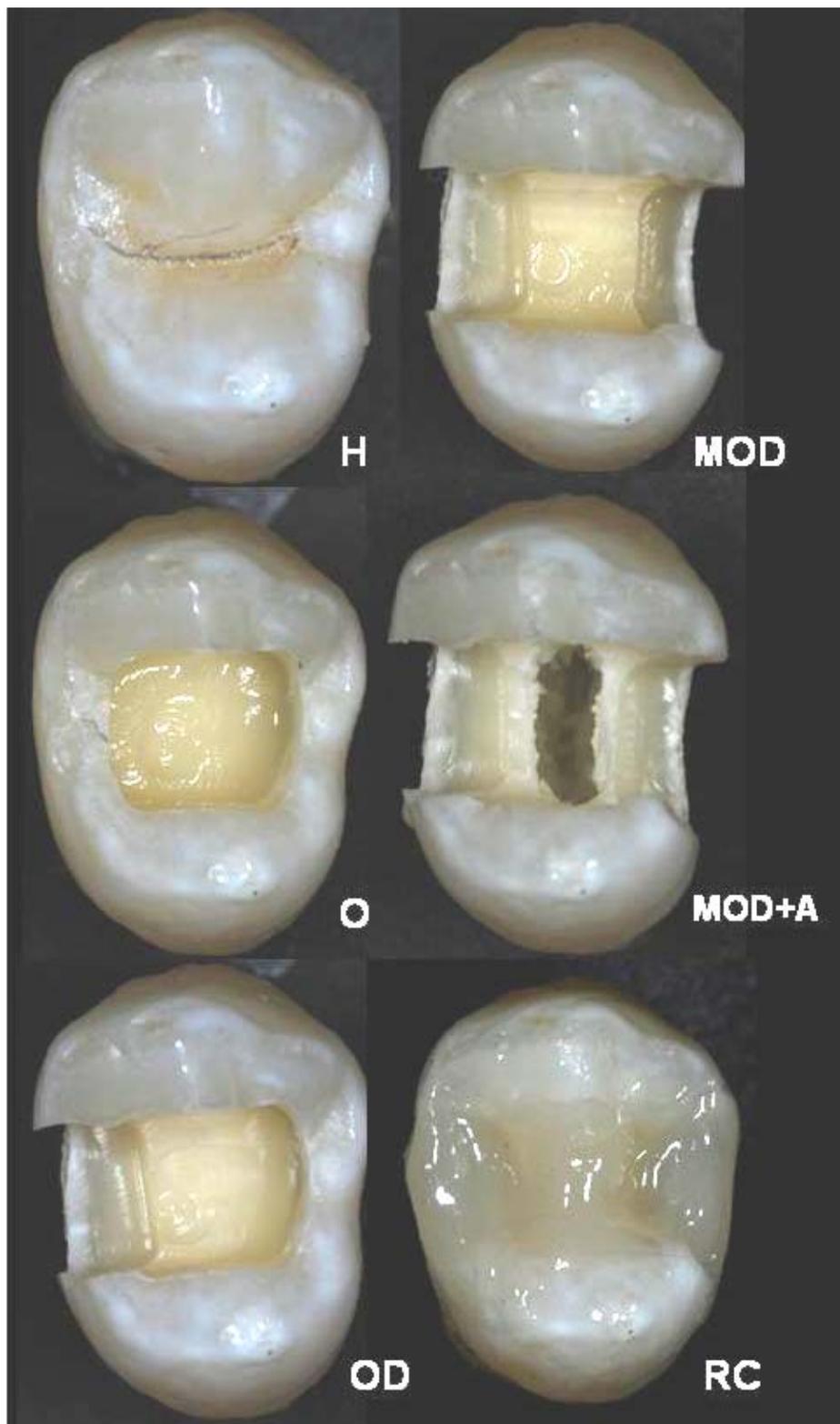


Figura 11 – Redução seqüencial de estrutura dental e restauração com resina.

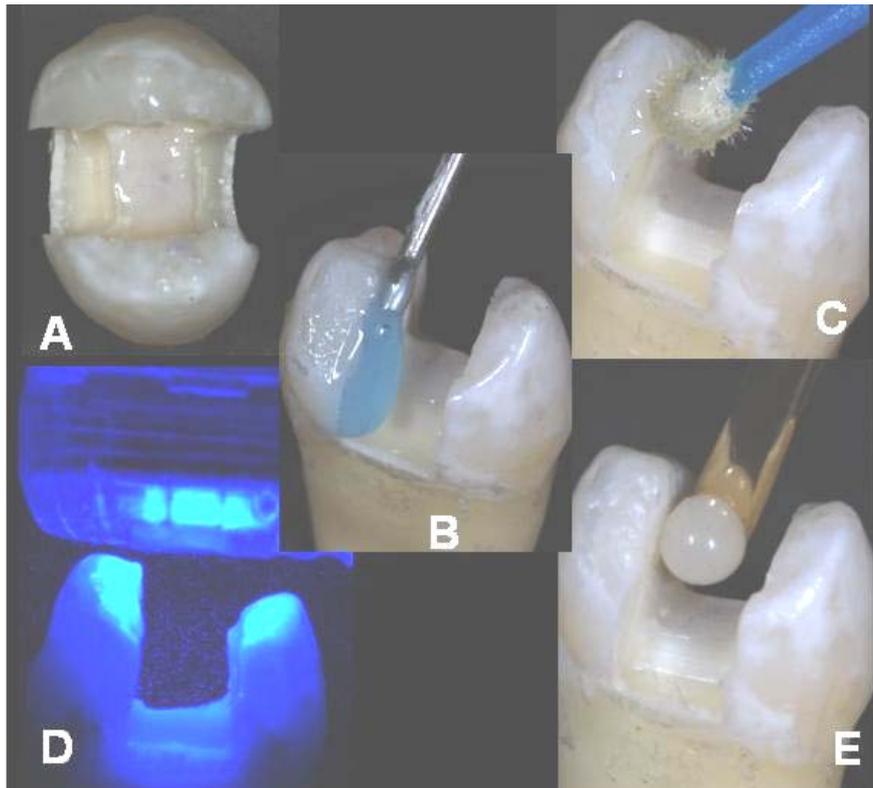


Figura 12 – Confecção das restaurações de resina composta. (A) Selamento com cimento de ionômero de vidro; (B) Condicionamento com ácido fosfórico; (C) Aplicação do sistema adesivo; (D) Fotoativação do sistema adesivo; (E) Aplicação incremental de resina composta.

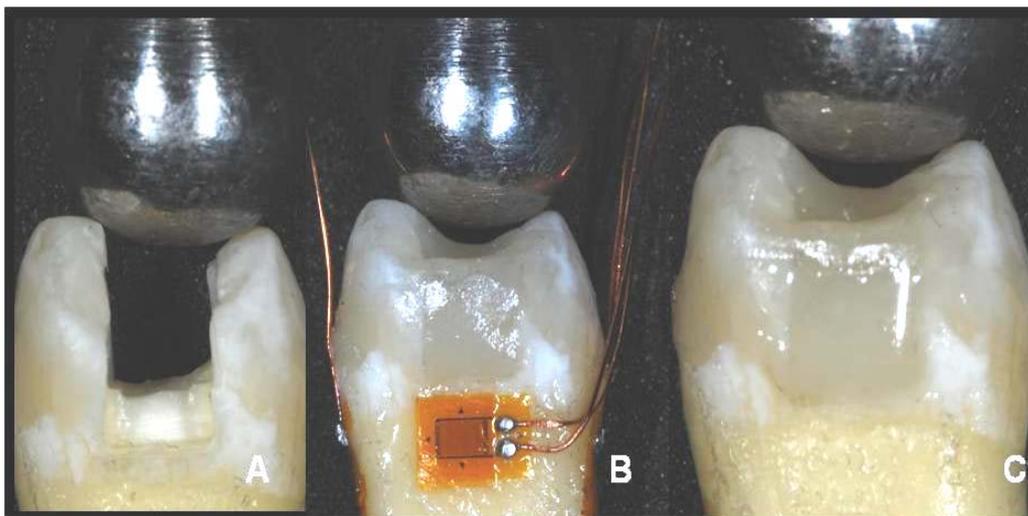


Figura 13 – Realização dos testes experimentais e relação esfera x dente. (A e B) teste de extensometria; (C) teste de resistência a fratura.

4.3 Resistência a fratura

Posteriormente, as amostras tratadas endodonticamente e restauradas com resina composta foram submetidas à aplicação de carga axial de compressão, com velocidade de 0,5mm/minuto, por meio de esfera de 8,0mm diâmetro contatando a cúspide vestibular e palatina (Figura 13) até a fratura em máquina de ensaio mecânico (EMIC DL 2000, São José dos Pinhais, Brasil). Os resultados foram obtidos em Newton (N) e submetidos à análise estatística para detecção de normalidade e homogeneidade e em seguida foi empregado análise de variância em fator único e teste de Tukey ($\alpha=0,05$), para avaliar a influência do tipo de morfologia radicular na resistência fratura e tipo de falha.

As amostras fraturadas foram analisadas em lupa estereoscópica 40X (Leica, Hanau, Alemanha) para determinar o padrão de fratura classificando-os em 4 tipos:

Tipo I, localizadas em dente e/ou restauração;

Tipo II, fraturas oblíquas com término em coroa;

Tipo III, fraturas oblíquas com término em dentina radicular;

Tipo IV, fraturas verticais de raiz.

5 RESULTADOS

No método de elementos finitos, por meio de análise qualitativa observou-se relação direta entre remoção seqüencial de estrutura dental e concentração de tensões nas regiões coronária e radicular. O modelo O e OD apresentaram altos níveis de concentração de tensões nas cristas marginais e sulcos secundários da coroa (figura 14). Por outro lado, os modelos MOD e MOD+A apresentaram sítios de concentração de tensões nos ângulos internos da caixa oclusal e proximal, paredes internas do canal radicular e base das cúspides (Figura 14). Os modelos restaurados com resina composta (RC) apresentaram comportamento similar aos modelos hígidos (H). A porção radicular dos modelos unirradiculares (Uni) apresentou padrão homogêneo de distribuição de tensões (Figura 15). A região de furca radicular e sulcos das faces proximais apresentaram altos níveis de concentração de tensões nos modelos FA, FM e FC (Figura 15 e 16).

No teste de extensometria, os valores médios de deformação das cúspides e face proximal, e desvio padrão estão dispostos na Tabela 4 e 5, respectivamente. A análise de variância indicou diferenças significativas entre os grupos e interação significativa entre os fatores. Para deformação das cúspides o teste de Tukey ($p < 0,05$) demonstrou que não houve diferença entre os grupos Uni e FA independente do tipo de remoção de estrutura. Os grupos que possuíam furca cervical (FC) apresentaram os maiores valores de deformação. Este comportamento foi similar para a deformação da face proximal, independente do tipo de remoção de estrutura ou tratamento.

Os valores médios de resistência à fratura e o desvio padrão para os grupos experimentais estão dispostos na Tabela 6 e a distribuição do padrão de fratura está descrita na Figura 17 e ilustrada na Figura 18. O tipo de morfologia radicular testado não promoveu diferença estatística entre os valores médios dos grupos testados. Entretanto, a análise do padrão de fratura enfatizou a maior incidência de fraturas menos severas (tipo II e III) nos grupos Uni e FA. O grupo

FM apresentou distribuição homogênea entre os tipos de fratura. A presença da furca na região cervical favoreceu a maior incidência (80%) de fraturas catastróficas (tipo IV).

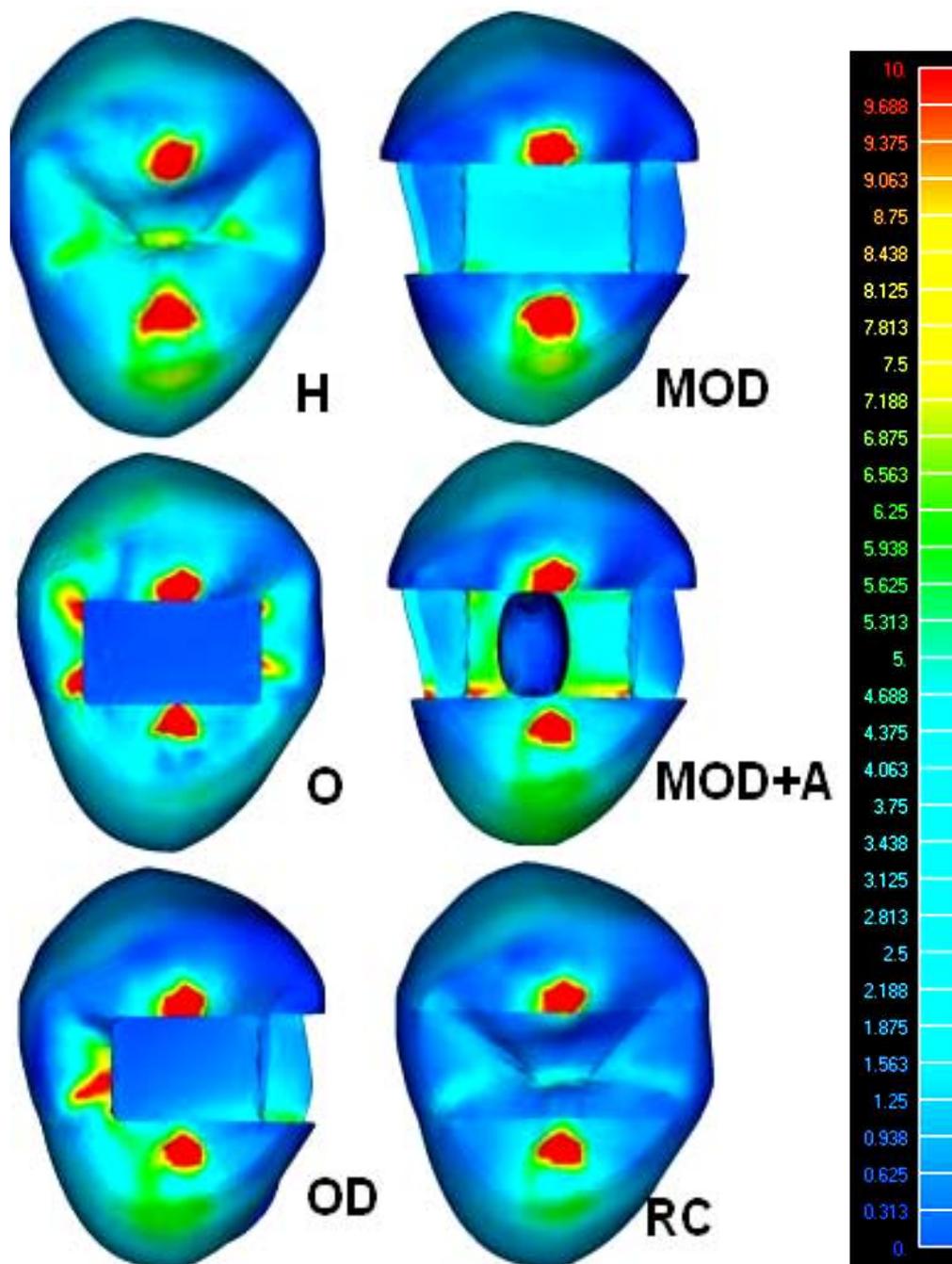


Figura 14 – Distribuição de tensões na região coronária em MPa.

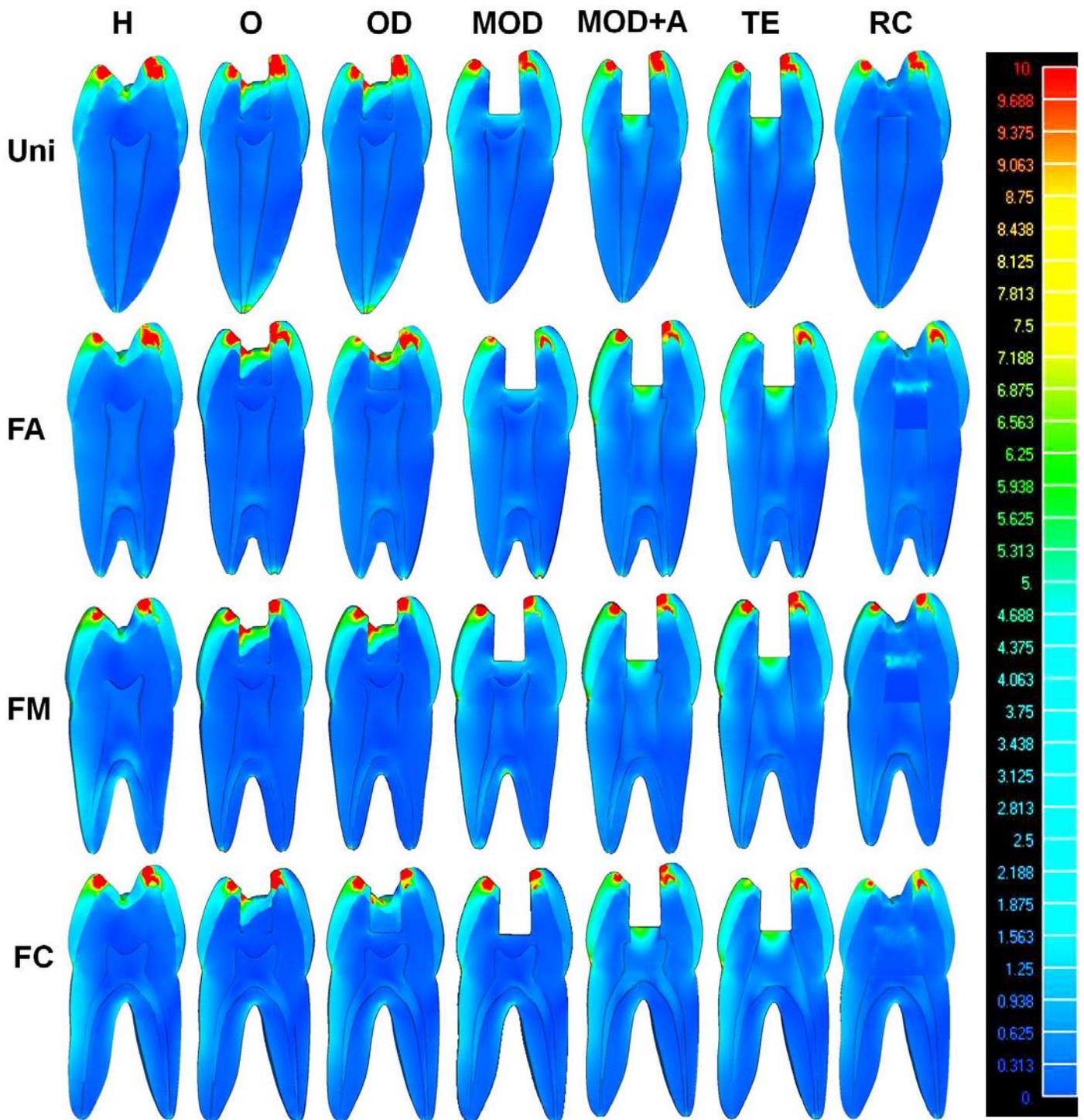


Figura 15 – Distribuição de tensões dos dentes enfatizando as diferentes distribuições na região radicular.

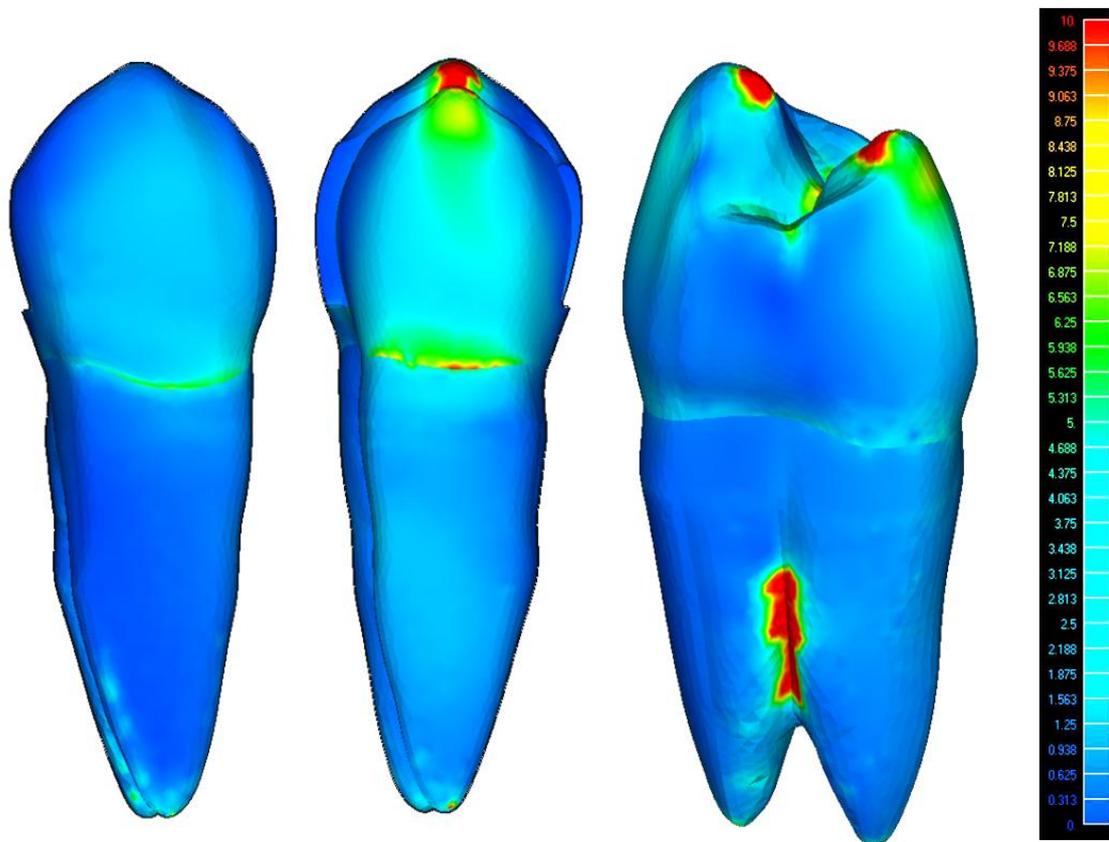


Figura 16 – Concentração de tensões na base das cúspides e sulcos das faces proximais.

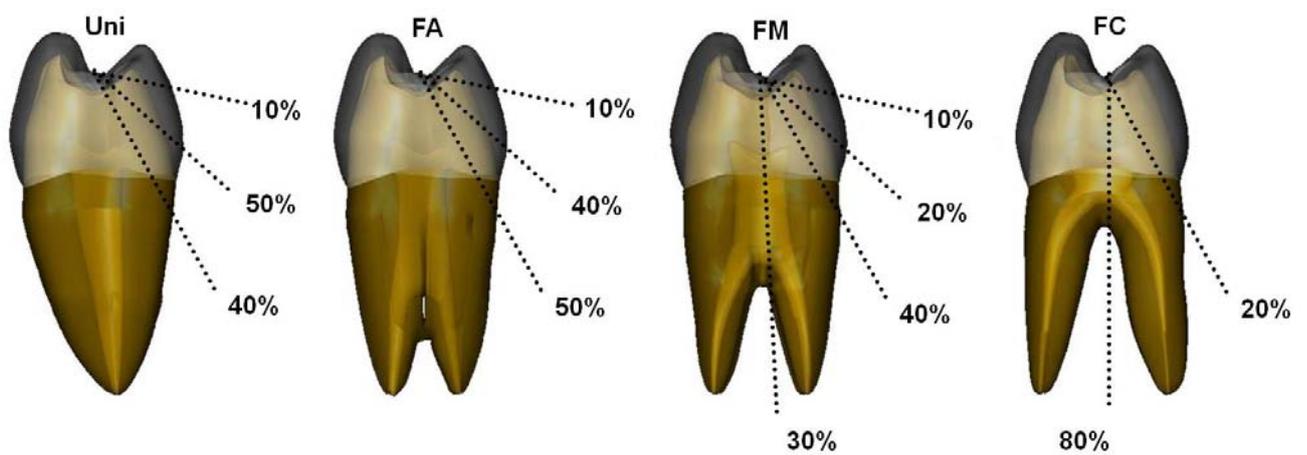


Figura 17 – Resultado da análise do padrão de fratura.

Tabela 4 - Valores modulares de microdeformação (μS) obtidos na base das cúspides vestibular e palatina, Tukey ($p < .05$).

	H	O	DO	MOD	MOD+A	TE	RC
Uni	305,7(89,4)Aa	568,9(84,4)Ab	992,0(118,2)Ac	1093,5(287,5)Ad	1215,5(344,7)Ae	1349,8(207,0)Ae	276,1(58,5)Aa
FA	280,3(73,3)Aa	543,4(93,1)Ab	1002,8(134,6)Ac	1102,4(245,4)Ad	1286,9(422,0)Ae	1297,2(303,0)Ae	255,5(92,4)Aa
FM	387,7(76,6)ABa	663,4(59,9)ABb	1077,7(257,4)ABc	1202,0(178,8)ABd	1447,8(190,8)ABe	1449,8(287,7)ABe	358,1(85,1)ABa
FC	418,1(84,5) Ba	705,1(142,7)Bb	1170,8(341,9) Bc	1324,5(156,6) Bd	1625,5(202,6) Be	1652,7(196,6) Be	476,3(93,8) Ba

Letras maiúsculas comparação na vertical; Letras minúsculas comparação na horizontal.

Tabela 5 - Valores de microdeformação (μS) obtidos na face proximal, Tukey ($p < .05$).

	H	O	DO	MOD	MOD+A	TE	RC
Uni	36,8(12,4)Aa	37,4(17,0)Aa	187,7(72,9)Ab	243,3(98,1)Ac	239,0(98,9)Ac	244,1(88,5)Ac	43,3(16,2)Aa
FA	42,3(19,4)Aa	57,3(21,5)Aa	181,1(84,2)Ab	232,7(64,2)Ac	231,8(99,7)Ac	235,4(97,8)Ac	48,4(16,6)Aa
FM	46,5(13,4)Aa	72,5(39,9)Aa	190,1(89,6)Ab	241,0(99,1)Ac	281,4(118,1)Ac	289,1(124,8)Ac	52,9(21,0)Aa
FC	57,4(18,7)Ba	96,1(41,9)Ba	235,1(75,4)Bb	390,9(99,3)Bc	477,1(178,8)Bc	495,2(147,1)Bc	70,5(31,2)Ba

Letras maiúsculas comparação na vertical; Letras minúsculas comparação na horizontal.

Tabela 6 - Valores de resistência à fratura (N), Tukey ($p < .05$).

	Resistência à fratura	Desvio padrão	Categoria estatística
Uni	918,6	119,0	A
FM	908,6	130,6	A
FC	906,7	134,5	A
FA	902,6	159,3	A

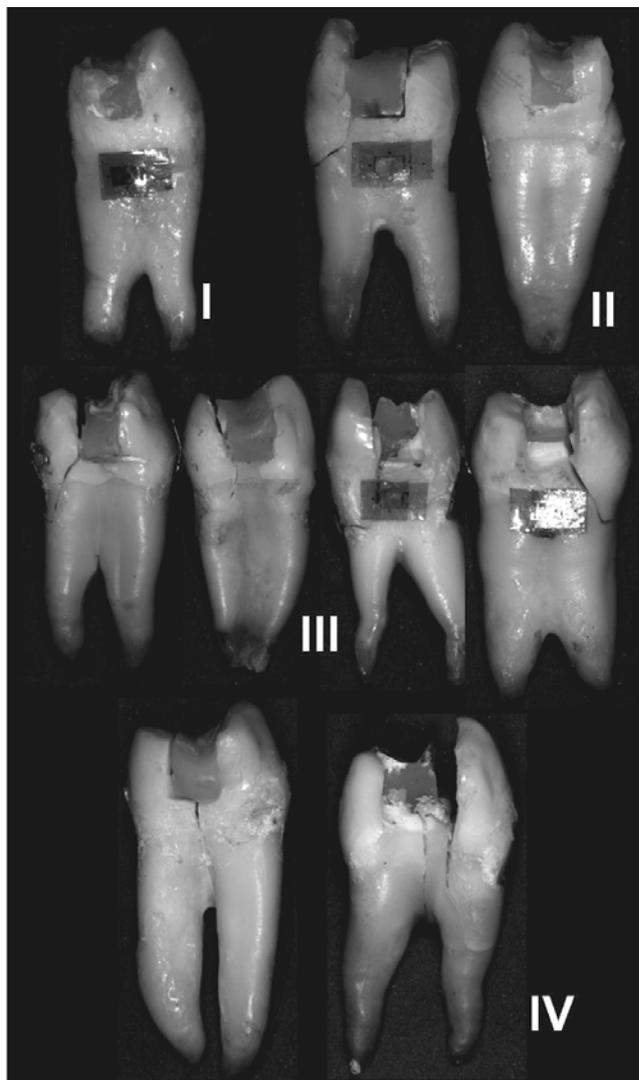


Figura 18 – Ilustração do tipo de fratura.

6 DISCUSSÃO

As duas hipóteses testadas neste estudo foram aceitas. A remoção de estrutura dental na porção coronária e o tipo de morfologia radicular influenciaram no comportamento biomecânico de pré-molares superiores.

Desde os princípios de preparo cavitário preconizados por Black diversos estudos foram realizados observando-se morfologias e quantidade de remoção de estrutura dental coronária (Mondelli et al., 1980). No entanto, os pré-molares superiores apresentam alta complexidade da anatomia radicular, com variações de marcos anatômicos importantes para o tratamento periodontal, endodôntico e restaurador (Tamse et al., 2000). Com relação à estrutura dentinária radicular pode-se observar neste grupo de dentes a presença de depressões e sulcos profundos nas faces proximais (Pilo et al., 2008). Estas depressões e sulcos são mais evidentes e pronunciadas na face mesial, e aumenta gradativamente a profundidade em direção a região da furca radicular (Joseph et al. 1996). Este foi o principal motivo pela seleção da face proximal para colagem do extensômetro, pois esta é mais plana e facilita o processo de colagem. Assim, com o extensômetro colado na face distal, a primeira crista a ser removida seqüencialmente foi a crista marginal distal. A quantidade de raízes e a presença de furca são variações anatômicas radiculares importantes neste grupo de dentes. Kartal et al. (1998), após análise de 600 pré-molares superiores, encontraram 37,31% de primeiro pré-molares unirradiculares e 61,32% de birradiculares; e para os segundo pré-molares 69,94% unirradiculares e 29,66% de birradiculares. Em estudo *in vitro* após seleção de 100 pré molares superiores hígidos Joseph et al. (1996) observaram que 63% apresentavam raízes fusionadas e 37% eram birradiculares. A característica das raízes, no entanto parece apresentar algumas semelhanças, como por exemplo, a redução do diâmetro do canal radicular na região cervical e na direção mesio-distal, o que promove um achatamento da raiz na mesma direção (Pilo et al, 2008).

Analisando somente dentes birradiculares, os pré-molares apresentam variação da localização da furca na porção radicular. A furca localiza-se no terço apical em 35% dos dentes, no terço médio em 38% e no terço cervical em 27% dos dentes; sendo que a distância entre a região de furca até o limite amelo-cementário varia de 4 a 14,6mm (Joseph et al., 1996). Esta variação de localização da furca é importante para o comportamento do dente quando associa-se diferentes etapas do procedimento restaurador, o que será discutido a seguir. Deutsch et al. (2005) mensuraram a distância entre a parede de fundo da câmara pulpar e o extremo do ângulo formado pela furca radicular, e encontrou distância média de 1,85mm, com valor mínimo de 0,60mm e máximo de 5,5mm. Outro marco anatômico importante, de acordo com os estes autores, é projeção da furca vestibular que caracteriza 62% dos primeiros pré-molares superiores na porção interna da raiz vestibular. Este sulco é considerado importante para o tratamento reabilitador, pois nesta região a dentina é menos espessa, podendo ser reduzida pela terapia endodôntica, caracterizando-se juntamente com a região de furca, como fatores de concentração de tensão.

Os resultados obtidos pelo método de elementos finitos evidenciaram regiões de concentração de tensão em todas as furcas, independente da sua localização (Figuras 15). Pode-se observar também que os sulcos das faces proximais, principalmente na mesial promoveram índices de concentração de tensões evidentes, não só nos modelos birradiculares, mas também nos modelos uniradiculares. As regiões de furca e sulcos profundos apresentam menor volume de estrutura e ângulos que se caracterizam como fatores intensificadores de tensão (Lertichirakarn et al., 2003). O tratamento endodôntico promoveu aumento da concentração de tensões nas paredes externas da dentina e internas do canal radicular (Figura 15). Este comportamento foi influenciado principalmente pela remoção de estrutura dentinária interna (Soares et al., 2008a).

Com relação à redução seqüencial de estrutura dental na porção coronária os resultados de elementos finitos enfatizaram real importância das cristas

marginais durante o carregamento oclusal. Analisando pré-molares superiores com preparos OD, Shahrbafe et al. (2007) demonstraram que não houve diferença na resistência a fratura de cristas marginais com espessura de 1,0; 1,5 e 2,0mm quando comparadas com dentes hígidos. No entanto, analisando a crista marginal com 0,5mm de espessura, pôde-se observar resultados estatisticamente semelhantes com os preparos MOD. A presença de esmalte sem suporte de dentina em cristas marginais de 0,5mm pode ser fator causador desta redução na resistência a fratura, devido a sua friabilidade e baixa resistência a tração.

Altos níveis de concentração de tensões podem ser observados na crista marginal nas regiões de sulcos secundários e no esmalte que a compõe. A conformação dos sulcos secundários sob a crista promove acúmulo de tensões em seu interior pelo mesmo mecanismo intensificador de tensões dos sulcos das faces proximal radicular citado anteriormente. Já o maior acúmulo de tensões na camada de esmalte da crista é provocado pela alta rigidez desta estrutura. Esta característica é consequência do alto módulo de elasticidade do esmalte em relação as outras estruturas dentais, o que permite suportar maiores níveis de tensões no seu interior (Soares et al., 2008c).

Os modelos OD, MOD e MOD+A apresentaram crescente aumento de tensões nos ângulos internos vestibulo-pulpar, palatino-pulpar, e das paredes de fundo da caixa proximal. Este aumento é provocado pela remoção seqüencial de estrutura dental: crista mesial, crista distal e parte da parede pulpar, respectivamente. Quanto maior a remoção de estrutura hígida do preparo cavitário, maior será a profundidade deste, o que promove acúmulo de tensões no interior da estrutura (Soares et al., 2008b; Lin et al., 2008) e o risco de fratura das cúspides (Soares et al., 2008a; Siso et al., 2007; Soares et al., 2006). Este comportamento também pode ser observado pelos dados obtidos na análise da deformação de cúspide. Quanto maior a remoção de estrutura maior a deformação das cúspides (Sakaguchi et al., 1991; Reeh et al., 1989; Morin et al., 1988) e da face proximal. Independente do tipo de tratamento, a furca média e principalmente

a furca cervical influenciou significativamente na deformação das cúspides vestibular-palatina (Tabela 4) e da face proximal (Tabela 5). O fator para este comportamento é a menor quantidade de dentina na região cervical devido à maior proximidade da furca com o limite amelo-cementário, sendo esta região importante para suportar as tensões e deformações geradas pela flexão das cúspides.

Empregando recursos específicos do programa de CAD (Rhinoceros 3D), foi possível obter em porcentagem a quantidade de estrutura removida em cada fase do preparo dos modelos (Apêndice 2). Analisando estes dados observa-se que mais importante do que a quantidade de estrutura removida, é que tipo de estrutura e qual sua importância na função do elemento dental. A confecção do preparo oclusal corresponde a redução de 6% de estrutura dental. A remoção da crista marginal equivale a aproximadamente 7,5% da quantidade total do pré-molar, dentro dos limites do preparo preconizado. No entanto percebe-se que 1,5% a mais de estrutura dental removida alteraram todo o comportamento das estruturas internas do preparo (figura 15). Analisando as deformações obtidas na superfície proximal pode-se observar que a remoção seqüencial das cristas marginais e acesso endodôntico influenciaram diretamente no aumento da deformação nesta região, independente do tipo de morfologia radicular (Tabela 5). Por outro lado, o acesso endodôntico também foi fator determinante na maior deformação observada pelas cúspides vestibular e palatina (Tabela 4).

Pôde-se observar comportamento similar do modelo RC com o modelo H. O padrão de distribuição de tensões foi similar devido a simulação das condições laboratoriais de adesão as estruturas dentais ao material restaurador, os quais foram consideradas unidos. Os dados presentes no Apêndice 2 comprova que todo o volume de resina composta foi reconstruído no modelo RC, e devido a simulação do selamento com cimento de ionômero de vidro, o volume excedeu em 1,4% do dente hígido. Este comportamento também foi observado pela análise da deformação das cúspides e da face proximal. Todos os dentes restaurados com

resina composta apresentaram resultados estatisticamente semelhantes aos dentes hígidos, devido à capacidade de adesão da resina composta às estruturas dentais por meio do processo de hibridização (Sagsen et al., 2006; Soares et al., 2008a, Eakle et al., 1986) o que convalida os resultados apresentados pelo método de elementos finitos.

Após o ensaio de extensometria todas as amostras foram submetidas a carregamento axial de compressão até a fratura. Pôde-se observar que não houve diferença estatística entre os grupos Uni, FA, FM e FC, ou seja, a presença e distância da furca apesar de influenciar diretamente no ensaio de extensometria, não influenciou nos valores de resistência a fratura. Dois fatores são fundamentais para o entender deste comportamento: primeiro, o tamanho das amostras foram padronizados em relação a todas as distâncias verticais e horizontais, tanto na porção radicular quanto na porção coronária (Apêndice 3). Segundo, o teste de extensometria é mais propenso a variações de geometria e condições de teste (Soares et al., 2008c), ou seja, apresenta maior capacidade de obtenção de detalhes devido à sensibilidade do sistema de aquisição de sinais empregado, além de se poder individualizar a região a ser testada (Santos-Filho et al., 2008), neste caso: base das cúspides vestibular-palatina e face proximal. Por outro lado, a análise dos resultados do teste de resistência a fratura não pode ser desvinculada da análise do padrão de fratura, pois esta análise é fundamental para compreender e validar o processo de concentração de tensões, deformação da estrutura e propagação da trinca.

O padrão de fratura foi classificado em fraturas não severas e severas. Fraturas consideradas não severas foram classificadas como tipo I (coesiva dente-restauração) e II (oblíqua supra-gengival), sendo também consideradas como fraturas restauráveis. As fraturas severas são classificadas como tipo III (oblíqua sub-gengival) e IV (fratura vertical de raiz), sendo a primeira restaurável ou não e a segunda: fratura não-restaurável ou catastrófica. Assim, correlacionando todos os dados obtidos pelas análises computacionais e experimentais, pôde-se

observar que o grupo Uni apresentou 50% de fraturas tipo II e 40% tipo III. O grupo FA apresentou 40% de fratura tipo II e 50% tipo III. O grupo FM apresentou 40% de fraturas tipo III e 30% tipo IV, e o grupo FC apresentou 80% de fraturas tipo IV (Figura 17). Dois fatores são determinantes deste tipo de comportamento: o primeiro está relacionado à morfologia da coroa e o segundo com a morfologia da raiz.

Com relação à morfologia coronária, deve-se ressaltar que a coroa do pré-molar superior apresenta diferentes morfologias, com relação ao volume, altura e inclinação das cúspides (Siso et al., 2007). Estas alterações anatômicas alteram o padrão de contato dispositivo-dente e direcionamento dos vetores de força durante o carregamento (Apêndice 3). Em alguns casos, a cúspide vestibular é maior que a cúspide palatina, acometendo na maioria das vezes os primeiros pré-molares superiores (Picosse, 1977). Nos casos de mesma altura, a distribuição dos vetores de força é mais homogênea, devido à similaridade das duas forças resultantes geradas pelo contato com a esfera. Por outro lado, o ângulo formado pelos planos que tangenciam a superfície externa das vertentes triturantes (α) parece ser fator determinante do tipo de fratura oblíqua. Os dentes que possuíam o ângulo α agudo apresentaram tendência de fratura tipo II, ou seja, oblíqua, menos inclinada para cervical e término supra-gengival. Os dentes que possuíam o ângulo α obtuso apresentaram tendência de fratura tipo III, ou seja, oblíqua, mais inclinada para cervical e com término sub-gengival (Apêndice 3). Este mecanismo pode ser responsável pelo padrão de fratura mesclado entre tipo II e III para os grupos Uni e FA.

Com relação à morfologia radicular, observou-se que a presença da furca na região cervical a uma distância média de 4,06mm (Apêndice 1) próxima ao limite amelo-cementário foi fator determinante das fraturas tipo IV apresentadas pelo grupo FC. Este tipo de fratura é denominado de fratura vertical de raiz, ou seja, linha de fratura que se estende através do esmalte e dentina paralela ao eixo axial do dente (Cohen et al, 2003). Em análise demográfica de fratura vertical de

todos os dentes, 23,35% acometem os pré-molares superiores, seguido de 21,59% os primeiros molares inferiores, 21,15% os segundos molares inferiores, 11,45% primeiros molares superiores, 8,81% incisivos superiores, 7,93% os incisivos e pré-molares inferiores, 5,73% segundos molares superiores (Cohen et al., 2006). Os principais fatores relacionados a fratura vertical de raiz é tratamento endodôntico, espessura de dentina, curvatura do canal, morfologia radicular, a qual é fator determinante na direção da fratura (Sathorn et al., 2005). Nos pré-molares superiores a redução do diâmetro na direção mesio-distal da região cervical (Lertichirakarn et al., 2003), a presença de depressões e da furca parece ser fatores anatômicos auxiliares na promoção de fratura vertical de raiz. Este tipo de fratura é validado pelos sítios de concentração de tensões apresentados pelos modelos bifurcados e pelos maiores níveis de deformação da face proximal.

Este estudo apresentou algumas vantagens como o desenvolvimento de protocolo alternativo e de qualidade para geração de modelos tridimensionais para análise de elementos finitos. Esta técnica apresenta como principal vantagem custos relativamente baixos, visto que não houve a necessidade de equipamentos de custo elevado e pelo emprego de 2 programas (CAD-CAE). Comparando os modelos de dentes posteriores desenvolvidos por outros autores (Apêndice 4) pode-se observar a evolução dos modelos de pré-molares durante a última década, devido principalmente à evolução tecnológica; e que o modelo desenvolvido neste estudo apresenta geometria complexa, alta qualidade de definição e controle de malha adequado. Outras vantagens foram a utilização de extensômetros em todas as amostras testadas, visto que é técnica de alto custo e normalmente são selecionadas algumas amostras para o teste (Soares et al., 2008c). Como limitação deste estudo destaca-se a simplificação do modelo com relação à isotropia, homogeneidade e linearidade da análise, e ausência de análises quantitativas dos resultados. Para estudos futuros sugere-se o desenvolvimento de modelos com estruturas orto e anisotrópicas, empregando heterogeneidade de fases estruturais, e análises não-lineares.

Os resultados deste trabalho sugerem inicialmente que para a seleção de pré-molares superiores para estudos laboratoriais, independente do tipo de tratamento restaurador que será realizado, a atenção a morfologia radicular durante padronização dos dentes é fator fundamental para o sucesso e credibilidade dos resultados, pois se percebe variação do tipo de pré-molar, assim como do tipo de dispositivo e técnica de carregamentos utilizados (Apêndice 5). Clinicamente, extensas destruições coronárias associadas com presença de furca na região cervical devem ser restauradas com maior atenção e acompanhadas periodicamente por meio de radiografias em diferentes angulações. A análise da distribuição dos pontos de contato oclusal e ajuste oclusal são fundamentais para a longevidade destas restaurações. As fraturas verticais de raiz podem ser diagnosticadas por meio de análise radiográfica, inspeção com sonda exploradora, teste de transiluminação, teste de vitalidade pulpar, análise periodontal (Cohen et al., 2003). No entanto, como o prognóstico deste tipo de lesão é praticamente irreparável, sugere-se meios de prevenção, como máxima conservação de estrutura dental hígida durante preparos cavitários, terapias endodônticas, remoção de cárie, associando com o emprego de restaurações adesivas.

7 CONCLUSÃO

Dentro das limitações deste estudo pôde-se concluir que:

1. A remoção de estrutura dental favoreceu maior acúmulo de tensões e deformação de esmalte e dentina, sendo as cristas marginais as estruturas de maior influência;
2. O tipo de morfologia radicular influenciou nos níveis de deformação de cúspide e face proximal, sendo a furca cervical o fator mais importante no aumento dos valores de deformação;
3. O tipo de morfologia radicular não influenciou nos valores de resistência a fratura. No entanto, os resultados da análise do padrão de fratura demonstraram que a furca presente no terço cervical e sulcos profundos das faces proximais são responsáveis pela maior incidência de fraturas catastróficas em pré-molares superiores birradiculares.
4. Restaurações adesivas diretas contribuem para reforço das estruturas dentais de preparos intra-coronários.

REFERENCIAS

Ausiello P, Apicella A, Davidson CL, Rengo S. 3D-finite element analyses of cusp movements in a human upper premolar, restored with adhesive resin-based composites. *J Biomech.* 2001;34:1269-77.

Cohen S, Berman LH, Blanco L, Bakland L, Kim JS. A demographic analysis of vertical root fractures. *J Endod.* 2006;32(12):1160-3.

Cohen S, Blanco L, Berman L. Vertical root fractures: clinical and radiographic diagnosis. *J Am Dent Assoc.* 2003;134(4):434-41.

Combining structural-thermal coupled field FE analysis and the Taguchi method to evaluate the relative contributions of multi-factors in a premolar adhesive MOD restoration. *J Dent.* 2008 Jun 10. (In Press).

Deutsch AS, Musikant BL, Gu S, Isidro M. Morphological measurements of anatomic landmarks in pulp chambers of human maxillary furcated bicusps. *J Endod.* 2005;31(8):570-3.

Eakle WS. Fracture resistance of teeth restored with class II bonded composite resin. *J Dent Res.* 1986;65(2):149-53.

Ichim I, Schmidlin PR, Kieser JA, Swain MV. Mechanical evaluation of cervical glass-ionomer restorations: 3D finite element study. *J Dent.* 2007;35(1):28-35.

Joseph I, Varma BR, Bhat KM. Clinical significance of furcation anatomy of the maxillary first premolar: a biometric study on extracted teeth. *J Periodontol.* 1996;67(4):386-9.

Joshi S, Mukherjee A, Kheur M, Mehta A. Mechanical performance of endodontically treated teeth. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2001;37:587-601.

Kartal N, Ozçelik B, Cimilli H. Root canal morphology of maxillary premolars. *J Endod*. 1998;24(6):417-9.

Katz A, Wasenstein-Kohn S, Tamse A, Zuckerman O. Residual dentin thickness in bifurcated maxillary premolars after root canal and dowel space preparation. *J Endod*. 2006;32(3):202-5.

Lanza A, Aversa R, Rengo S, Apicella D, Apicella A. 3D FEA of cemented steel, glass and carbon posts in a maxillary incisor. *Dent Mater*. 2005;21:709-15.

Lertchirakam V, Palamara JE, Messer HH. Finite element analysis and strain-gauge studies of vertical root fracture. *J Endod*. 2003;29:529-34.

Lin CL, Chang CH, Ko CC. Multifactorial analysis of an MOD restored human premolar using auto-mesh finite element approach. *J Oral Rehabil*. 2001;28:576-85.

Lin CL, Chang YH, Lin YF. Combining structural-thermal coupled field FE analysis and the Taguchi method to evaluate the relative contributions of multi-factors in a premolar adhesive MOD restoration. *J Dent* 2008;36:626-36.

Magne P. Efficient 3D finite element analysis of dental restorative procedures using micro-CT data. *Dent Mater*. 2007;23(5):539-48.

Mondelli J, Steagall L, Ishikiriama A, de Lima Navarro MF, Soares FB. Fracture strength of human teeth with cavity preparations. *J Prosthet Dent*. 1980;43:419-22.

Pilo R, Shapenco E, Lewinstein I. Residual dentin thickness in bifurcated maxillary first premolars after root canal and post space preparation with parallel-sided drills. *J Prosthet Dent.* 2008;99(4):267-73.

Reeh ES, Messer HH, Douglas WH. Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. *J Endod.* 1989;15:512-6.

Rees JS, Jacobsen PH, Hickman J. The elastic modulus of dentine determined by static and dynamic methods. *Clin Mater.* 1994;17:11-5.

Romeed SA, Fok SL, Wilson NH. A comparison of 2D and 3D finite element analysis of a restored tooth. *J Oral Rehabil.* 2006;33(3):209-15.

Sagsen B, Aslan B. Effect of bonded restorations on the fracture resistance of root filled teeth. *Int Endod J.* 2006;39(11):900-4.

Sakaguchi RL, Brust EW, Cross M, DeLong R, Douglas WH. Independent movement of cusps during occlusal loading. *Dent Mater.* 1991;7:186-90

Santos-Filho PC, Castro CG, Silva GR, Campos RE, Soares CJ. Effects of post system and length on the strain and fracture resistance of root filled bovine teeth. *Int Endod J.* 2008;41(6):493-501.

Sathorn C, Palamara JE, Palamara D, Messer HH. Effect of root canal size and external root surface morphology on fracture susceptibility and pattern: a finite element analysis. *J Endod.* 2005;31(4):288-92.

Secco AS, Martins LRM, Góes MF, Consani S, Spinelli D, Takeya T. Efeito do suporte de esmalte com ionômero de vidro ou resina composta na rigidez de cúspides. *Revista da Associação Paulista de Cirurgiões Dentistas* 2000;54(4): 322-326

Shahrbaf S, Mirzakouchaki B, Oskoui SS, Kahnamousi MA. The effect of marginal ridge thickness on the fracture resistance of endodontically-treated, composite restored maxillary premolars. *Oper Dent.* 2007;32(3):285-90.

Siso SH, Hümmüzlü F, Turgut M, Altundaşar E, Serper A, Er K. Fracture resistance of the buccal cusps of root filled maxillary premolar teeth restored with various techniques. *Int Endod J.* 2007;40(3):161-8.

Soares CJ, Martins LR, Fonseca RB, Correr-Sobrinho L, Fernandes Neto AJ. Influence of cavity preparation design on fracture resistance of posterior Leucite-reinforced ceramic restorations. *J Prosthet Dent.* 2006;95(6):421-9.

Soares CJ, Pizi EC, Fonseca RB, Martins LR. Influence of root embedment material and periodontal ligament simulation on fracture resistance tests. *Pesqui Odontol Bras.* 2005;19(1):11-6.

Soares PV, Santos-Filho PC, Queiroz EC, Araújo TC, Campos RE, Araújo CA, Soares CJ. Fracture resistance and stress distribution in endodontically treated maxillary premolars restored with composite resin. *J Prosthodont.* 2008;17(2):114-9.a

Soares PV, Santos-Filho PC, Martins LR, Soares CJ. Influence of restorative technique on the biomechanical behavior of endodontically treated maxillary premolars. Part I: fracture resistance and fracture mode. *J Prosthet Dent.* 2008;99(1):30-7.b

Soares PV, Santos-Filho PC, Gomide HA, Araujo CA, Martins LR, Soares CJ. Influence of restorative technique on the biomechanical behavior of endodontically

treated maxillary premolars. Part II: strain measurement and stress distribution. J Prosthet Dent. 2008;99(2):114-22.c

Tamse A, Fuss Z, Lustig J, Kaplavi J. An evaluation of endodontically treated vertically fractured teeth. J Endod. 1999;25(7):506-8.

Tamse A, Katz A, Pilo R. Furcation groove of buccal root of maxillary first premolars--a morphometric study. J Endod. 2000;26(6):359-63.

Toparli M, Gokay N, Aksoy T. Analysis of a restored maxillary second premolar tooth by using three-dimensional finite element method. J Oral Rehabil. 1999;26:157-64.

Wright KW, Yettram AL. Reactive force distributions for teeth when loaded singly and when used as fixed partial denture abutments. J Prosthet Dent. 1979;42:411-6.

ANEXO 1



Universidade Federal de Uberlândia
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA - CEP
Av. João Naves de Ávila, nº 2160 - Bloco J - Campus Santa Mônica - Uberlândia-MG -
CEP 38400-089 - FONE/FAX (34) 3239-4131

PARECER DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA Nº 381/06

Registro CEP: 217/06

Projeto Pesquisa: "Mapeamento do comportamento biomecânico de pré-molares superiores com redução seqüencial de estrutura dental"

Pesquisador Responsável: Carlos José Soares.

De acordo com as atribuições definidas na Resolução CNS 196/96, o CEP manifesta-se pela aprovação do projeto de pesquisa proposto.

Situação: O protocolo não apresenta problemas de ética nas condutas de pesquisa com seres humanos, nos limites da redação e da metodologia apresentadas.

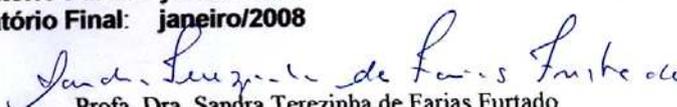
O CEP/UFU lembra que:

- a- segundo a Resolução 196/96, o pesquisador deverá arquivar por 5 anos o relatório da pesquisa e os Termos de Consentimento Livre e Esclarecido, assinados pelo sujeito de pesquisa.
- b- poderá, por escolha aleatória, visitar o pesquisador para conferência do relatório e documentação pertinente ao projeto.
- c- a aprovação do protocolo de pesquisa pelo CEP/UFU dá-se em decorrência do atendimento a Resolução 196/96/CNS, não implicando na qualidade científica do mesmo.

Data para entrega do **Relatório Parcial:** janeiro/2007

Data para entrega do **Relatório Final:** janeiro/2008

08 de dezembro de 2006.


Prof. Dra. Sandra Terezinha de Farias Furtado
Coordenadora do CEP/UFU

Orientações ao pesquisador:

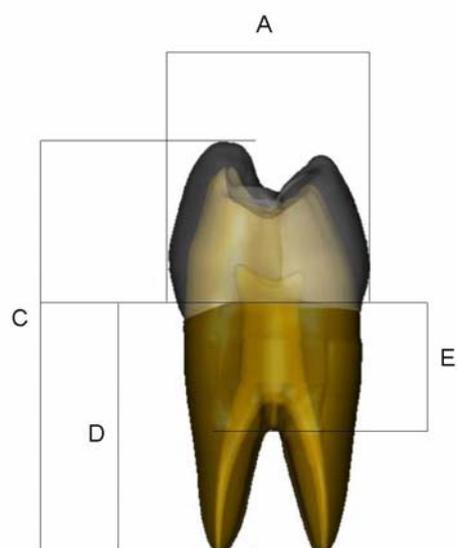
(Para parecer Aprovado ou Aprovado com Recomendações)

- O sujeito da pesquisa tem a liberdade de recusar-se a participar ou de retirar seu consentimento em qualquer fase da pesquisa, sem penalização alguma e sem prejuízo ao seu cuidado (Res. CNS 196/96 - Item IV.1.f) e deve receber uma cópia do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, na íntegra, por ele assinado (Item IV.2.d).
- O pesquisador deve desenvolver a pesquisa conforme delineada no protocolo aprovado e descontinuar o estudo somente após análise das razões da descontinuidade pelo CEP que o aprovou (Res. CNS Item III.3.z), aguardando seu parecer, exceto quando perceber risco ou dano não previsto ao sujeito participante ou quando constatar a superioridade de regime oferecido a um dos grupos da pesquisa (Item V.3) que requeiram ação imediata.
- O CEP deve ser informado de todos os efeitos adversos ou fatos relevantes que alterem o curso normal do estudo (Res. CNS Item V.4). É papel do pesquisador assegurar medidas imediatas adequadas frente a evento adverso grave ocorrido (mesmo que tenha sido em outro centro) e enviar notificação ao CEP e à Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA – junto com seu posicionamento.
- Eventuais modificações ou emendas ao protocolo devem ser apresentadas ao CEP de forma clara e sucinta, identificando a parte do protocolo a ser modificada e suas justificativas. Em caso de projetos do Grupo I ou II apresentados anteriormente à ANVISA, o pesquisador ou patrocinador deve enviá-las também à mesma, junto com o parecer aprovatório do CEP, para serem juntadas ao protocolo inicial (Res. 251/97, item III.2.e). O prazo para entrega de relatório é de 120 dias após o término da execução prevista no cronograma do projeto, conforme norma da Res. 196/96 CNS.

Apêndice 1

Dimensões dos pré-molares utilizados neste estudo

Uni	A	B	C	D	E
1	10,2	7,2	21,6	11,6	x
2	9,4	6,8	20,7	12,1	x
3	8,6	6,4	19,1	14,3	x
4	9,2	7,6	19,2	12,7	x
5	10	7,9	24,3	13,4	x
6	8,9	7,2	21	11,7	x
7	9,5	7,6	21,1	12,7	x
8	9,1	6,6	19,4	12,3	x
9	10	7,5	22,3	13,4	x
10	8,8	7,3	20,3	11,9	x
Média	9,37	7,21	20,9	12,61	
FA	A	B	C	D	E
1	9,7	7,7	20,5	13,2	10,9
2	9,9	8	21,3	13,5	11,8
3	9,7	7,3	21,9	13,8	11,2
4	9,4	7	22	13,7	12,6
5	10,2	7,7	21	12,7	9,8
6	9,4	6,8	21	13,1	10,8
7	10,4	7,9	22,1	13	12,2
8	9,3	7,1	21,4	14,6	12
9	9,1	7,4	22,3	14,5	13,3
10	10,3	7,9	19,6	12,6	10,9
	9,74	7,48	21,31	13,47	11,55
FM	A	B	C	D	E
1	9,5	7,2	20,4	12,8	6
2	9,4	6,9	20,7	12,4	6,8
3	9,3	7,6	20,6	12,7	6,2
4	9,9	7,3	22	13,1	7,2
5	8,7	7,1	22	13,3	7,2
6	10,4	8,4	22,3	14,4	7,3
7	8,7	6,9	20,1	11,2	6,3
8	10	8,1	23,2	13,1	7,3
9	10,3	7,8	23,6	13,5	6,3
10	10,2	7,8	22,3	14	6,2
	9,64	7,51	21,72	13,05	6,68
FC	A	B	C	D	E
1	10,3	7,7	21,7	13	3,4
2	10,7	8,2	21,7	13,1	3,6
3	10,2	7,7	22,9	14,9	4,8
4	9,4	7,4	21,9	13,9	4,2
5	9,7	7,1	22,6	14,7	4,8
6	9,9	7,5	20,2	13,1	3,4
7	9,5	7,6	20,7	12,8	3,3
8	9,4	7,1	22,2	13,8	4,7
9	9,8	7,9	24,3	15,2	4,2
10	8,9	7,1	21,5	13,8	4,2
	9,78	7,53	21,97	13,83	4,06

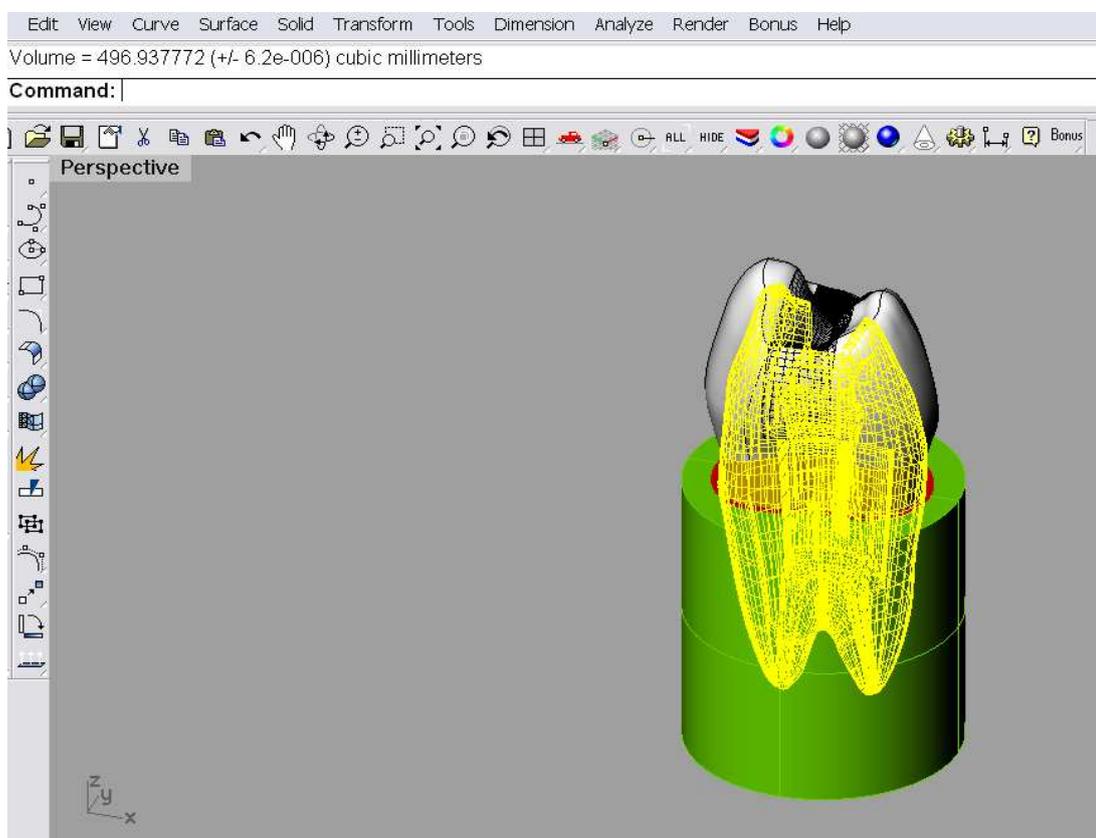


Apêndice 2

Quantificação da redução seqüencial de estrutura

A mensuração foi realizada no software Rhinoceros empregando ferramenta para mensuração do volume (mm^3). A diferença de volume foi convertida em porcentagem por meio de regra de três simples. Pode-se observar a quantidade relativa de redução de estrutura entre os diferentes tipos de preparos.

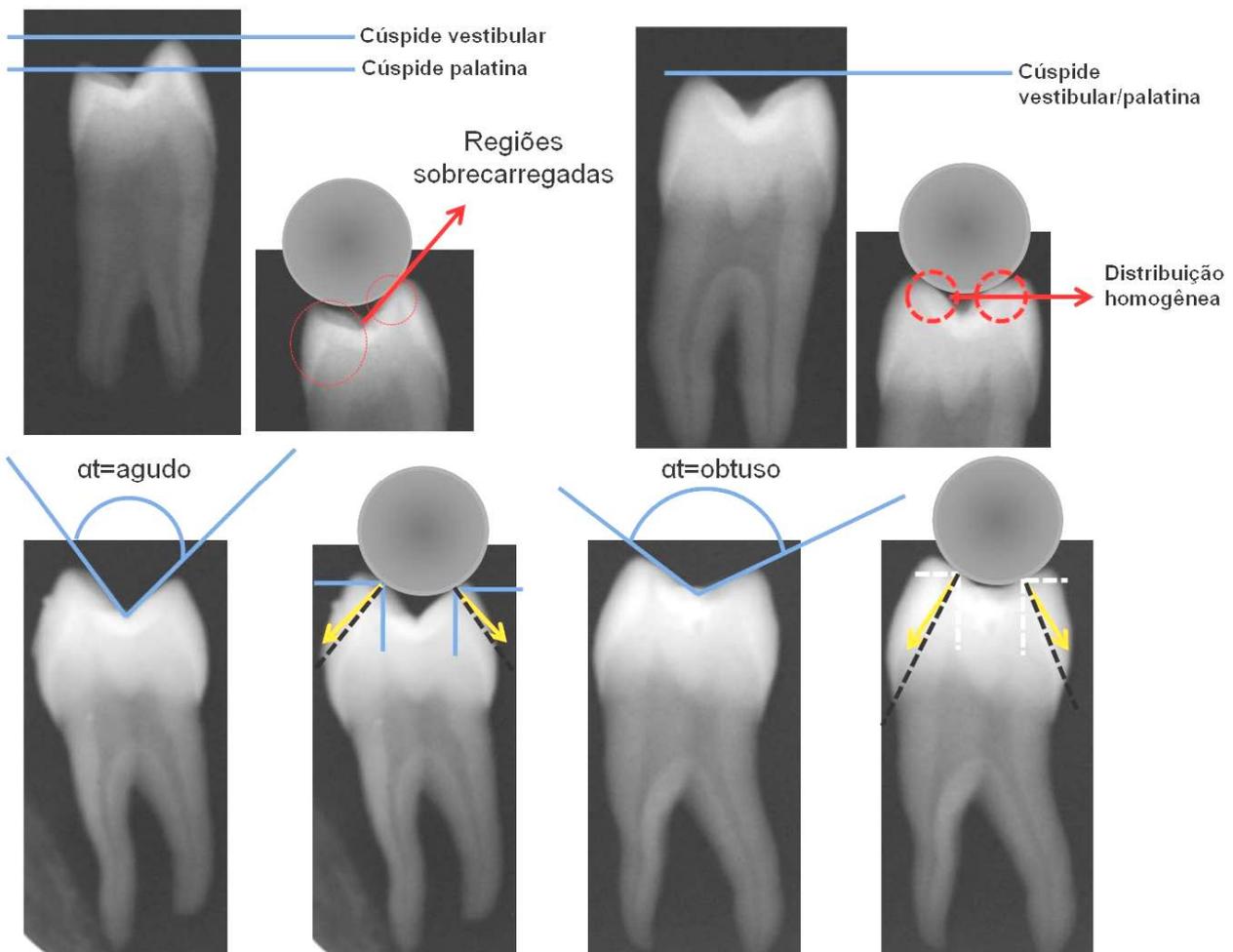
Tratamento	Volume (mm^3)	%
H	702,23	100
O	660,25	94,0
OD	649,96	92,5
MOD	624,46	88,9
MOD+A	617,60	87,9
TE	616,10	87,7
RC	712,75	101,4



Apêndice 3

Influência da morfologia coronária no tipo de contato esfera x dente

Pode-se observar que tanto a altura quanto a inclinação das cúspides vestibular e palatina alteram o contato do dispositivo de aplicação de carga com a coroa dental.



Apêndice 4

Diferentes métodos de geração de modelos tridimensionais para análises biomecânicas de pré-molares

Pode-se observar a evolução dos modelos tridimensionais de pré-molares, as diferentes técnicas e softwares empregados para geração dos modelos e análises.

- 1) No estudo de Romeed et al o software PATRAN (MSC, Santa Ana, CA, USA) foi empregado para geração do modelo, processamento e análise. Apesar da simplificação da geometria, este trabalho desenvolveu técnicas diferenciadas de condições de contorno.

Journal of Oral Rehabilitation 2006 33; 209–215

A comparison of 2D and 3D finite element analysis of a restored tooth

S. A. ROMEED*, S. L. FOK[†] & N. H. F. WILSON[‡] *Department of Oral Surgery, St John's Hospital, Chelmsford, Essex, [†]School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester, Manchester and [‡]Guy's, King's and St Thomas' Dental Institute, King's College London, London, UK

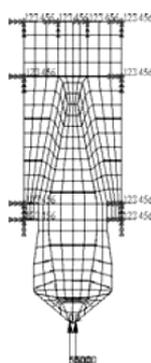


Fig. 1. Two-dimensional finite element model of the mesiodistal section of the crowned second maxillary premolar with boundary conditions and occlusal loading.

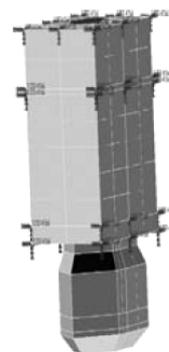


Fig. 3. The three-dimensional finite element model of a crowned second maxillary premolar with boundary conditions.

2) No estudo de Lertchirakarn et al o modelo 3D de raiz foi desenvolvido para simulação de fratura, a análise foi realizada em fatias 2D. Os modelos foram gerados e processados pelo software Lusas FEA system Pty. Ltd., Cheltenham, Victoria, AUS). Este estudo associou métodos de elementos finitos com análises experimentais de fratura.

Finite Element Analysis and Strain-gauge Studies of Vertical Root Fracture

Veera Lertchirakarn, MDS, PhD, Joseph E. A. Palamara, PhD, and Harold H. Messer, MDS, PhD

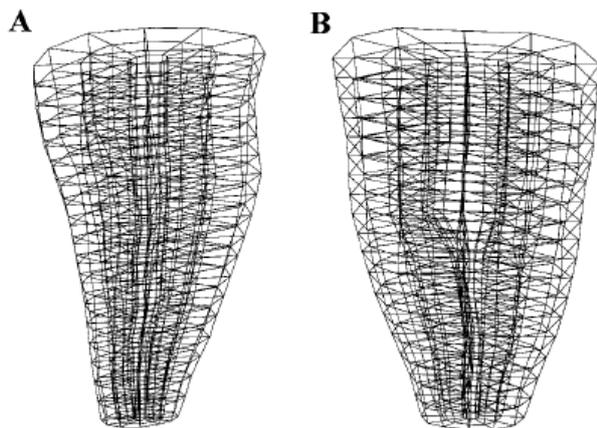


FIG 2. Oblique view of the 3-D finite element models, with periodontal ligament and alveolar bone support omitted. (A) Maxillary incisor root model; (B) mandibular incisor root model.

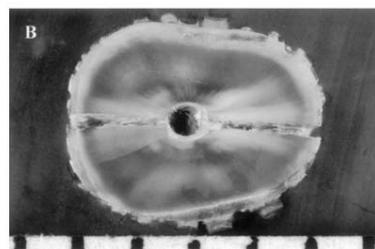


FIG 3. Experimentally fractured maxillary central incisor, showing buccolingual root fracture (A) and cross-section 4 mm from the root apex (B). The spreader space was completely surrounded by gutta-percha, after fracture (scale: 1 mm).

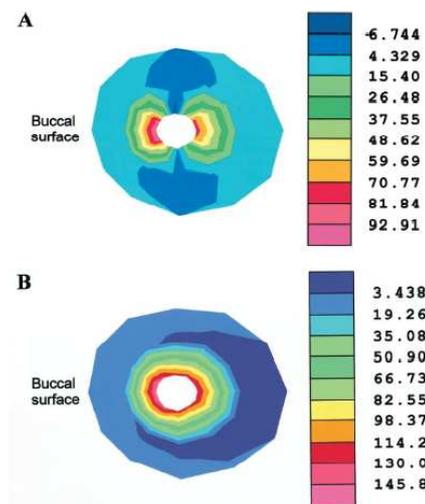


FIG 4. Tensile stress contours (S1) of maxillary incisor root model, with different applied load cases: (A) with applied load on proximal root canal surfaces (load case I); (B) with uniform applied load around the entire root canal surface (load case II). The cross-sectional views depict tensile stress distributions. The values of S1 (in MPa) correspond with lines between colors.

- 3) O estudo de Toparli et al também associou MEF com testes laboratoriais. Para geração dos modelos os autores utilização a linguagem FORTRAN 77, e não foi citado o módulo de processamento e análise dos resultados.

Journal of Oral Rehabilitation 1999 **26**; 157–164

Analysis of a restored maxillary second premolar tooth by using three-dimensional finite element method

M. TOPARLI*, N. GÖKAY† & T. AKSOY* **Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Dokuz Eylül University, Bornova, İzmir and †Department of Operative Dentistry, Faculty of Dentistry, Ege University, Bornova, İzmir, Turkey*

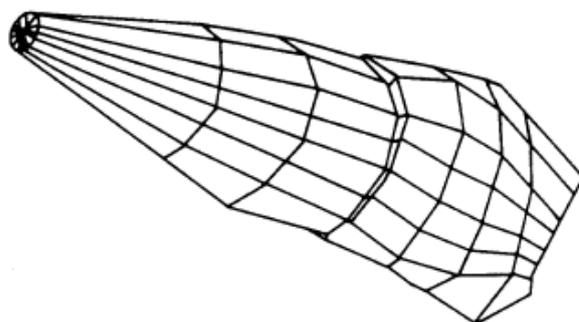


Fig. 1. Three dimensional finite element model of the tooth.

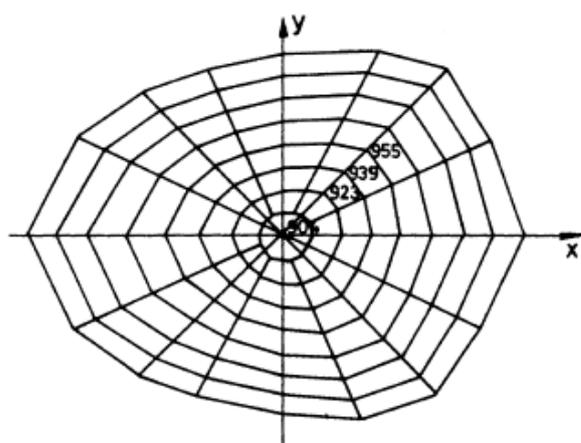


Fig. 2. The upper surface of the tooth.

- 4) Em 2001, Ausiello et al desenvolveram modelo 3D com características e detalhes que enriqueceram a análise dos resultados. Além da geometria, qualidade no controle da malha. Os modelos foram gerados em CAD (Auto CAD, Desktop, USA e Pro-Engineer, Parametric Technology, USA) e processado/analísado no Ansys 5.3 (Ansys Inc., USA).



3D-finite element analyses of cusp movements in a human upper premolar, restored with adhesive resin-based composites

P. Ausiello^{a,*}, A. Apicella^b, C.L. Davidson^c, S. Rengo^a

^aSchool of Dentistry, University of Naples, "Federico II", Policlinico Edificio 14, Via Pansini 5, 80131 Naples, Italy

^bDepartment of Material & Production Engineering, University of Naples, "Federico II", Italy

^cDepartment of Dental Materials Sciences, ACTA, University of Amsterdam, The Netherlands

Accepted 30 May 2001

P. Ausiello et al. / Journal of Biomechanics 34 (2001) 1269–1277

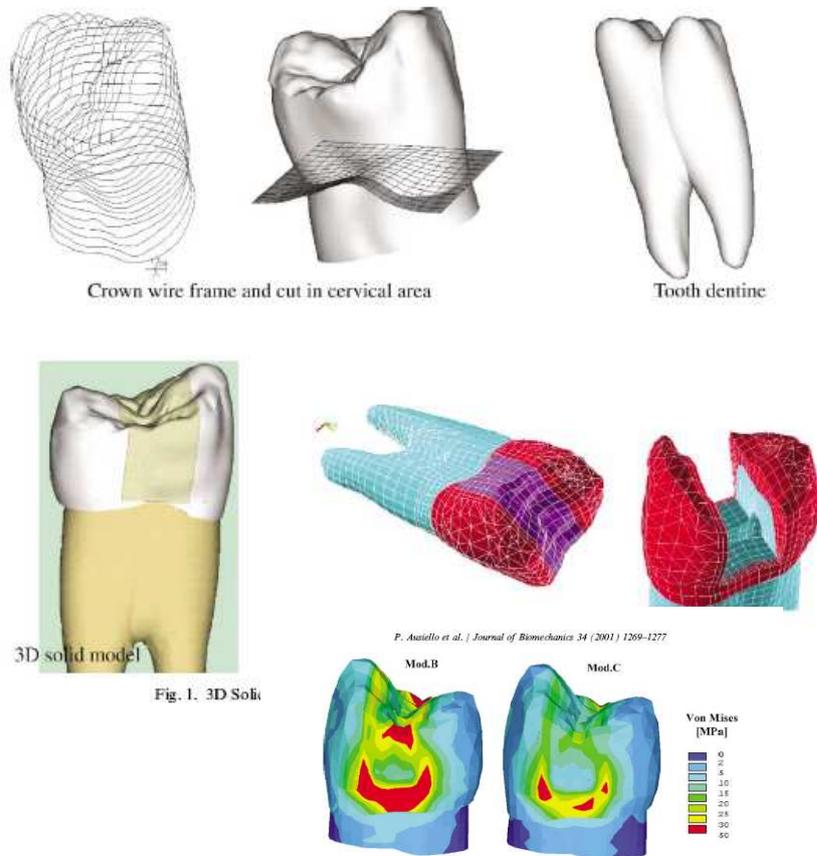


Fig. 1. 3D Solid

- 5) Técnicas com maior investimento tecnológico foi empregada por Lin et al. Este estudo não associou MEF com análises experimentais. O modelo foi gerado pelo scaneamento a laser de pré-molar hígido. Posteriormente, os dados foram exportados para Pro-Engineer e processado/analísado no Ansys 8.0.

available at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.intl.elsevierhealth.com/journals/jden

Multi-factorial analysis of a cusp-replacing adhesive premolar restoration: A finite element study

Chun-Li Lin ^{a,*}, Yen-Hsiang Chang ^{b,1}, Perng-Ru Liu ^{c,2}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Chang Gung University, 259 Wen-Hua 1st Road, Kwei-Shan, Tao-Yuan 333, Taiwan
^bOperative Dentistry, Chang Gung Memorial Hospital, 123, Ding-Hu Road, Kwei-Shan, Tao-Yuan 333, Taiwan
^cDepartment of Comprehensive Dentistry, University of Alabama, School of Dentistry, 1919 7th Ave. South,

196 JOURNAL OF DENTISTRY 36 (2008) 194–203

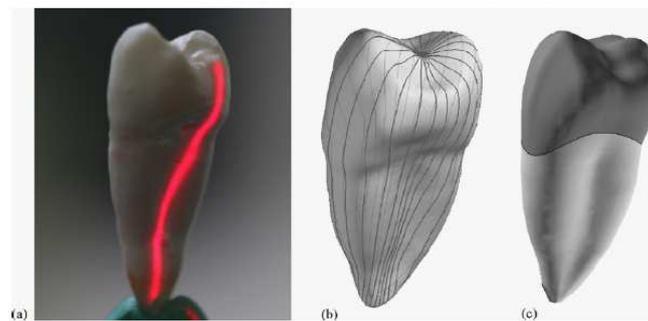


Fig. 1 – Solid model construction of sound premolar. (a) Laser beam scanned the plastic tooth. (b) Twenty-four profiles along the radial direction from the central fossa of the crown to the apical root at 15-degree increments were collected from the

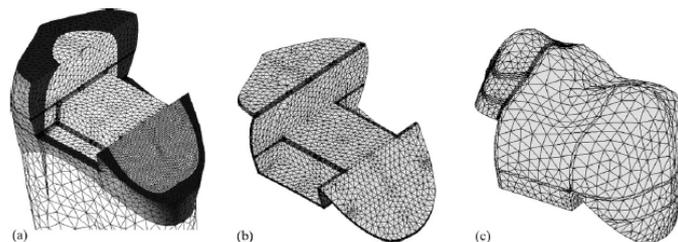


Fig. 3 – Finite element models. (a) Remaining tooth (crown region); (b) cement layer (150 μm) and (c) restorative material.

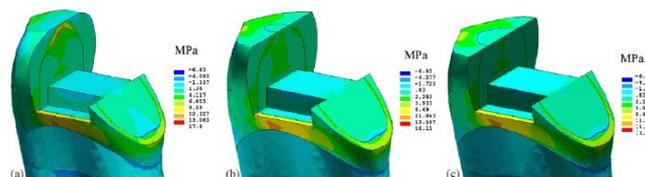


Fig. 6 – The principal stress patterns in remaining tooth (dentin and enamel) with CAD/CAM ceramic block and 100 μm cement thickness for (a) coverage 1.0 mm design, (b) coverage 1.5 mm design and (c) coverage 2.0 mm design.

Apêndice 5

Variação do tipo de amostra, dispositivo e técnica de carregamento encontrada nos estudos experimentais citados neste trabalho.

Referência	Tipo de teste	Tipo de PM	Dispositivo	Dimensão	Velocidade
<u>Mondelli et al., 1980</u>	Resistência a fratura	XXX	Esfera	$\varnothing = 4,0\text{mm}$	<u>0,5mm/min</u>
<u>Eakle, 1986</u>	Resistência a fratura	XXX	Cilindro	$\varnothing = 4,76\text{mm}$	<u>0,5mm/min</u>
<u>Reeh et al., 1989</u>	<u>Extensometria</u>	2º PM	Esfera	$\varnothing = 6,3\text{mm}$	37N/s
<u>Sakaguchi et al., 1991</u>	<u>Extensometria</u>	2º PM	Esfera	$\varnothing = 4,4\text{mm}$	XXX
<u>Sagsen & Aslan et al., 2006</u>	Resistência a fratura	XXX	Esfera	$\varnothing = 6,0\text{mm}$	<u>1,0mm/min</u>
<u>Siso et al., 2007</u>	Resistência a fratura	XXX	Faca	Oblíqua - 150°	<u>1,0mm/min</u>
<u>Shahrbaf et al., 2007</u>	Resistência a fratura	XXX	Faca	Oblíqua - 45°	<u>2,0mm/min</u>
<u>Soares et al., 2008a</u>	Resistência a fratura	<u>Unirradicular</u>	Cilindro	$\varnothing = 6,0\text{mm}$	<u>0,5mm/min</u>
<u>Soares et al., 2008b</u>	Resistência a fratura	<u>Unirradicular</u>	Esfera	$\varnothing = 6,0\text{mm}$	<u>0,5mm/min</u>
<u>Soares et al., 2008c</u>	<u>Extensometria</u>	<u>Unirradicular</u>	Esfera	$\varnothing = 6,0\text{mm}$	<u>0,5mm/min</u>

PM = pré-molar.

Apêndice 6

Estatística dos valores de Resistência à Fratura

Tests of Normality

	Grupos	Kolmogorov-Smirnov(a)			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
valores	unirradicular	,193	10	,200(*)	,941	10	,559
	furca apical	,246	10	,086	,890	10	,171
	furca media	,150	10	,200(*)	,953	10	,703
	furca cervical	,268	10	,040	,894	10	,189

* This is a lower bound of the true significance.

a Lilliefors Significance Correction

Test of Homogeneity of Variances

valores

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
,360	3	36	,782

ANOVA

valores

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1383,445	3	461,148	,025	,995
Within Groups	672772,766	36	18688,132		
Total	674156,211	39			

valores

Tukey HSD

Grupos	N	Subset for alpha = .05
furca apical	10	902,6800
furca cervical	10	906,7100
furca media	10	908,6200
unirradicular	10	918,6500
Sig.		,994

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 10,000.

Apêndice 7

Estatística dos valores de deformação da face Proximal

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Valores

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	4809372,100(a)	27	178124,893	24,675	,000
Intercept	9315240,962	1	9315240,962	1290,404	,000
Tratamento	3746355,759	6	624392,627	86,495	,000
Raiz	563040,249	3	187680,083	25,999	,000
Tratamento * Raiz	499976,091	18	27776,450	3,848	,000
Error	1819152,378	252	7218,859		
Total	15943765,440	280			
Corrected Total	6628524,478	279			

a R Squared = ,726 (Adjusted R Squared = ,696)

Valores

Tukey HSD

Tratamento	N	Subset		
		1	2	3
Higido	40	45,7925		
RC	40	48,8200		
oclusal	40	73,3400		
DO	40		198,5400	
MOD	40			276,9900
MOD+A	40			314,8650
TE	40			318,4325
Sig.		,774	1,000	,309

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 7218,859.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 40,000.

b Alpha = ,05.

Valores

Tukey HSD

Raiz	N	Subset	
		1	2
FA	70	147,0743	
UNI	70	148,8357	
FM	70	176,2386	
FC	70		257,4400
Sig.		,179	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 7218,859.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 70,000. b Alpha = ,05.

Apêndice 8

Estatística dos valores de deformação das Cúspides

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Valores

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	61548171,727(a)	27	2279561,916	53,627	,000
Intercept	215611771,166	1	215611771,166	5072,329	,000
Raiz	572652,505	3	190884,168	4,491	,004
Preparo	59881388,635	6	9980231,439	234,788	,000
Raiz * Preparo	1094130,587	18	60785,033	1,430	,118
Error	10711877,737	252	42507,451		
Total	287871820,630	280			
Corrected Total	72260049,464	279			

a R Squared = ,852 (Adjusted R Squared = ,836)

Valores

Tukey HSD

Raiz	N	Subset	
		1	2
FA	70	834,0666	
UNI	70	857,5217	
FM	70	865,2043	865,2043
FC	70		953,2890
Sig.		,808	,058

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 42507,451.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 70,000.b Alpha = ,05.

Tukey HSD

Preparo	N	Subset				
		1	2	3	4	5
RC	40	266,7000				
HIGIDO	40	297,9575				
OCLUSAL	40		570,2175			
DO	40			985,8390		
MOD	40				1180,6040	
MOD+A	40					1418,9405
TE	40					1422,3842
Sig.		,994	1,000	1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = 42507,451.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 40,000.b Alpha = ,05.